

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Machine Electrique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

**Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel  
COMSOL -Multiphysics**

Présenté par :  
**Seyf Eddine HAMDI**  
Soutenu le : 24 Juin 2018

Devant le jury composé de :

Mr Lotfi ALLOUI

Mr Mohamed Lotfi KHENE

M<sup>me</sup> Naima BENYAHIA

Prof.

MCA

MAA

Président

Encadreur

Examineur

**Année universitaire : 2017 / 2018**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Machine Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

**Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel  
COMSOL -Multiphysics**

**Présenté par :**

**Seyf Eddine HAMDI**

**Avis favorable de l'encadreur :**

**Mohamed Lotfi KHENE**

**Avis favorable du Président du Jury**

**Lotfi ALLOUI**

**Cachet et signature**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique

Filière : Electrotechnique  
Option : Machine Electrique

## *Thème :*

Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel  
COMSOL -Multiphysics

**Proposé par : Seyf Eddine HAMDI**

**Dirigé par : Mohamed Lotfi KHENE**

## Résumé

Le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. La simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels COMSOL-Multiphysics, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires. L'objectif de notre travail est de faire la modélisation des phénomènes électromagnétique et mécanique dans une machine asynchrone. Une modélisation visant le comportement général de la machine en régime dynamique et permanent, mais qui peut servir plus particulièrement le domaine de diagnostic des défauts. Dans ce contexte, nous étudions l'influence des différents paramètres tel que la valeur du couple résistant, l'instant d'imposer cette valeur sur le fonctionnement de la machine. Dans notre travail, nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics qui basé sur la méthode des éléments finis adopté comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristiques au problème magnétodynamique étudié dans la machine asynchrone proposée.

## المخلص

يعتبر المحرك غير المتزامن المحرك الأكثر استخدامًا في جميع التطبيقات الصناعية ، نظرًا لسهولة التنفيذ وصغر حجمه وأدائه الجيد وموثوقيته الممتازة. المحاكاة وسيلة فعالة واقتصادية شائعة الاستخدام للدراسات الأولية و / أو المقارنة ، سواء في مرحلة التطوير (التصميم) وأثناء التشغيل العادي للأنظمة. حاليًا ، يتم استخدام العديد من أدوات المحاكاة ، بما في ذلك COMSOL-Multiphysics ، في الصناعة والأوساط الأكاديمية. الهدف من عملنا هو تصميم الظواهر الكهرومغناطيسية والميكانيكية في آلة غير متزامنة. نمذجة تهدف إلى السلوك العام للآلة في الوضع الديناميكي والدائم ، ولكنها يمكن أن تخدم بشكل خاص مجال تشخيص العيوب. في هذا السياق ، ندرس تأثير المعلمات المختلفة مثل قيمة عزم المقاومة ، لحظة فرض هذه القيمة على تشغيل الآلة. في عملنا ، نستخدم برنامج COMSOL Multiphysics القائم على طريقة العناصر المحدودة المعتمدة كطريقة لحل المعادلات التفاضلية الجزئية المميزة للمشكلة المغناطيسية الدينامية التي تمت دراستها في الجهاز غير المتزامن المقترح.

# Dédicaces

À mes parents qui me sont les plus nobles et les plus chers du monde, pour leur soutien moral et encouragement dans toute ma vie. Que dieu me les garde (inchallah).

À mes frères et sœurs.

À tous mes amis et mes collègues.

À toute la famille du département de génie électrique de l'université de Biskra.

À tous ceux qui m'ont aimé et me souhaitent le bonheur et la réussite.

*Hamdi saif eddine*

## Remerciement

D'abord je remercie Dieu de nous avoir venu en aide pour que nous puissions aboutir à la réussite.

Nous tenons à remercier chaleureusement tous se qui avait la main, de près ou de loin pour la mise en oeuvre de ce fruit intellectuelle, un grand honneur, un grand remerciement particulièrement à mon encadreur **Pr. Khene Mohamed Lotfi**, et nous a fait preuve de bon foi pour ces directives et ces remarques, sincèrement il nous à aider achevé ce présent mémoire..

Je remercie vivement Mr. **Alloui lotfi**, le président de jury et l'examineur M<sup>me</sup>. **Benyahia Naima**, pour leur soutien remarquable qui nous a donnés cette volonté..

Je remercie aussi tous les responsables et les personnels du département de génie électrique, ainsi que tous les participants à notre formation.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi

Enfin je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues, et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant la réalisation de ce travail.

Merci ....

## Liste Des Figures

### Chapitre I

<b>Figure I. 1.</b> Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	6
<b>Figure I. 2.</b> Stator d'une machine asynchrone.....	7
<b>Figure I. 3.</b> Représentation schématique du stator.....	8
<b>Figure I. 4.</b> Le rotor à cage.....	9
<b>Figure I. 5.</b> Vue de la cage du rotor.....	9
<b>Figure I. 6.</b> L'inclinaison des barres de rotor.....	10
<b>Figure I. 7.</b> Représentation schématique des quatre quadrants du plan vitesse couple.....	11
<b>Figure I. 8.</b> Représentation schématique du couple en fonction de la vitesse mécanique....	13
<b>Figure I. 9.</b> Interaction rotor stator.....	14
<b>Figure I. 10.</b> Diagramme des puissances.....	15

### Chapitre III

<b>Figure III. 1.</b> Description d'un différence finies un deux dimension.....	27
<b>Figure III. 2.</b> Maillage du domaine d'étude.....	28
<b>Figure III. 3.</b> Un domaine d'étude discrétisé en Elément finis.....	29
<b>Figure III. 4.</b> les formes possibles des éléments élémentaires en (2D).....	30
<b>Figure III. 5.</b> Interface utilisateur de COMSOL 5.2a.....	31
<b>Figure III. 6.</b> Ajout de paramètres au modèle.....	34
<b>Figure III. 7.</b> Paramètres du modèle.....	34

**Figure III. 8.** Les matériaux .....34  
**Figure III. 8.** Maillage.....34

## Chapitre IV

**Figure IV. 1.** Moteur à induction triphasé.....37  
**Figure IV. 2.** choisir la dimension 2D.....38  
**Figure IV. 3.** Les modules étudiés .....38  
**Figure IV. 4.** Chois du régime temporelle.....38  
**Figure IV. 5.** Les étapes à suivre dessiné la géométrie de la machine.....39  
**Figure IV. 6.** La géométrie de la machine asynchrone étudiée.....39  
**Figure IV. 7.** Propriétés des domaines.....40  
**Figure IV. 8.** Les étapes à suivre pour faire le maillage.....40  
**Figure IV. 9.** Le maillage du domaine d'étude.....40  
**Figure IV. 10.** Les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t=0.8s$ .....41  
**Figure IV. 11.** La densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ .....42  
**Figure IV. 12.** La variation instantané du couple utile.....42  
**Figure IV. 13.** La variation instantanée de la vitesse du moteur..... 42  
**Figure IV. 14** La géométrie de la machine étudiée.....44  
**Figure IV. 15.** Le maillage du domaine d'étude.. .....44  
**Figure IV. 16.** Les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ .....45  
**Figure IV. 17.** La densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ .....45  
**Figure IV. 18.** La variation instantané du couple utile.....46

**Figure IV. 19.** La variation instantanée de la vitesse du moteur.....46

**Figure IV. 20.** La géométrie de la machine étudiée.....47

**Figure IV. 21.** Une coupe de cette machine.....48

**Figure IV. 22.** Le maillage du domaine d'étude.....48

**Figure IV. 23.** Les courants d'alimentations. ....48

**Figures IV. 24.** Les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ .....49

**Figures IV. 25.** La densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ .....50

**Figure IV. 26. (a-d)** La variation instantanée de la vitesse de rotation pour différents valeur du couple résistant respectivement  $C_r = 4, 6, 8$  et  $10 \text{ N.m}$ .....51

**Figure IV. 27. (a-d)** La variation instantanée de la vitesse de rotation pour différents valeur du couple résistant respectivement  $C_r = 4, 6, 8$  et  $10 \text{ N.m}$ .....52

**Figures IV. 28.** Les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 1s$ .....54

**Figures IV. 29.** La densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 1s$ .....54

**Figures IV. 30. (a-d)** La variation instantanée du couple utile pour différents valeur du couple résistant respectivement  $C_r = 4, 6, 8$  et  $10 \text{ N.m}$ ..... 55

**Figures IV. 31. (a-d)** La variation instantanée de la vitesse pour différents valeur du couple résistant respectivement  $C_r = 4, 6, 8$  et  $10 \text{ N.m}$ .....56

**Figure IV. 32. (a-b)** La variation instantanée du couple utile pour différents instant d'imposer une valeur de couple résistant.....57

**Figure IV. 33. (a-b)** La variation instantanée de la vitesse de rotation pour différents instant d'imposer une valeur de couple résistant.....58

**Figures IV. 34.** Le couple à l'état sein de la machine étudié.....59

**Figures IV. 35.** La vitesse de rotation à l'état sein de la machine étudiée.....59

**Figures IV. 36. (a-d)** La variation instantanée du couple utile pour différents valeurs de  $\sigma$ .....60

**Figure IV.37. (a-d)** La variation instantanée de la vitesse de rotation pour différents valeurs de sigma.....61

## Liste des Tableaux

<b>Tableau IV.1</b> Dimensions et paramètres de la machine.....	37
<b>Tableau IV.2</b> les paramètres de simulation.....	47

## Liste de symboles et abréviations

symboles	Définition
$\vec{H}$	Vecteur champs magnétique ( $A. m^{-1}$ )
$\vec{B}$	Vecteur induction magnétique ( $T$ )
$\vec{E}$	Vecteur champs électrique ( $V. m^{-1}$ )
$\vec{J}_c$	Vecteur densité du courant électrique de conduction ( $A. m^{-2}$ )
$\vec{D}$	Vecteur induction électrique (vecteur de déplacement) ( $A. m^{-2}$ )
$\vec{J}_{ex}$	Densité de courant d'excitation
$\vec{\sigma}$	Vitesse d'écoulement du fluide
$H_c$	Champs magnétique critique
$T_c$	Le temps critique
$F$	Force électromagnétique
$\mu$	Perméabilité magnétique
$\mu_0$	Perméabilité magnétique à vide [H/m]
$\mu_r$	Perméabilité magnétique relative
$\sigma$	Conductivité électrique
$\epsilon$	Permittivité électrique
$\rho$	Densité de charge volumique ( $C. m^{-3}$ )
$q$	Charge électrique
$e$	F.e.m induite
$\emptyset$	Matrice dans la base des fonctions
$\omega_s$	Pulsation [rad/s]
$\Omega_s$	Vitesse synchrone de rotation [rad/s].
$p$	Nombre de paires de pôles.
$n_s$	Vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant [tr/s]
$n$	Vitesse de rotation du rotor [tr/s ]
MEF	Méthode des éléments finis
MDF	Méthode des différences finies
MVF	Méthode des volumes finis
MCC	Méthode de circuits couplés
Rmm	Machines rotatives magnétiques

## Sommaire

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xv
Liste de symboles et abréviations.....	xvi
Introduction générale.....	1

### CHAPITRE I : Généralité Sur la machine asynchrone

I. 1 Introduction.....	3
I. 2 Généralités sur les machines asynchrones .....	3
I. 3 Définition.....	4
I. 4 Description de la machine asynchrone .....	4
I. 5 Utilisation.....	4
I. 5. 1 Moteur asynchrone.....	4
I. 5. 2 Générateur asynchrone.....	4
I. 6 Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone.....	5
I. 6. 1 Les avantages.....	5
I. 6. 2 Les inconvénients .....	5
I. 7 Mise en œuvre des moteurs asynchrones .....	5
I. 8 Constitution des machines asynchrone.....	5
I. 8. 1 Le stator .....	6
I. 8. 1.1 Réalisation du bobinage statorique .....	7
I. 8. 2 Le rotor.....	8
I. 8. 2. 1 Réalisation du bobinage rotorique .....	8

I. 8. 3 Les paliers.....	10
I. 9 Principe de la variation de la vitesse des machines asynchrones .....	10
I.10 Réglage de vitesse de la machine asynchrone.....	11
I. 10. 1 Réglage par variation du nombre de paires de pôles.....	12
I. 10. 2 Réglage par variation de la tension .....	12
I. 10. 3 Réglage par action sur le glissement.....	12
I. 10. 4 Réglage par variation de la fréquence.....	12
I. 11 Différentes caractéristiques de la machine asynchrone.....	13
I. 12 Diagramme de puissance.....	14
I. 13. Conclusion .....	14

## **CHAPITRE II : Formulations Mathématiques Des Phénomènes Electromagnétiques**

II .1 Introduction .....	16
II. 2 Les Equations De Maxwell .....	16
II.2.1. Equation de Maxwell-Faraday .....	17
II.2.2. Equation de Maxwell-Ampère.....	17
II.2.3. Equation de conservation de flux magnétique .....	17
II.2.4. Equation de Maxwell-Gauss .....	18
II. 3 Loi de comportement des matériaux (milieux physiques) .....	18
II. 4 Formulation des équations électromagnétiques .....	19
II. 4. 1 Modèle Electrostatique.....	19
II. 4. 2 Modèle Electrocinéétique.....	20
II. 4. 3 Modèle Magnétostatique.....	20
II. 4. 3. 1 Modèle magnétostatique scalaire.....	20

II. 4. 3. 2	Modèle magnétostatique vectorielle.....	21
II. 4. 4	Le Modèle magnétodynamique .....	22
II. 4. 4. 1	Formulation de L'équation Magnétodynamique .....	23
II. 5	Application des équations de Maxwell à la machine asynchrone à cage .....	24
II. 6	Conclusion .....	24

### CHAPITRE III : Méthodes numériques

III. 1	Introduction .....	25
III. 2	Différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles .....	25
III. 2. 1	Méthode analytique.....	25
III. 2. 1. 1	La méthode de séparation des variables .....	25
III. 2. 2	Méthodes des intégrales (semi analytique) .....	26
III. 2. 2. 1	Méthode des intégrales de frontières (MIF).....	26
III. 2. 2. 2	Méthode Des Circuits Couples (MCC).....	26
III. 2. 3	Méthodes numériques .....	26
III. 2. 3. 1	Méthode Des Différences Finies (MDF).....	26
III. 2. 3. 2	Méthode des Volumes Finis (MVF) .....	27
III. 2. 3. 3	Méthode des Eléments Finis (MEF).....	28
III. 2. 3. 3. 1	Démarche éléments finis .....	29
III. 2. 3. 3. 2	Maillage élément finis.....	30
III. 2. 3. 3. 3	Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis.....	30
III. 3	Description du logiciel «COMSOL MULTIPHYSICS».....	31
III. 3. 1.	Introduction à l'interface utilisateur de COMSOL 5.2a .....	31
III. 3. 2.	Création du modèle de simulation .....	32
III. 3. 3.	Définition des paramètres globaux et création de la géométrie.....	33
III. 3. 4.	Affectation des propriétés du matériau .....	34

III. 3. 5. Maillage.....	34
III. 3. 6. Simulation et traitement des résultats.....	35
III. 4. Conclusion.....	35

## CHAPITRE IV : Application

IV.1 Introduction.....	36
IV.2 Application N° 1 : Problème Workshop 30.....	36
IV. 2. 1 Description du système.....	36
IV. 2. 2 Étapes de résolution du problème.....	28
IV. 2. 2. 1 Choix du modèle.....	28
IV. 2. 2. 2 Choix des modules.....	28
IV. 2. 2. 3 Choix du type d'étude : Stationnaire, temporelle, fréquentielle. ....	28
IV. 2. 2. 4 Construction de la géométrie.....	29
IV. 2. 2. 5 Introduction des propriétés des domaines.....	40
IV. 2. 2. 6 Paramétrage et calcul du maillage .....	40
IV. 2. 2. 7 Résolution du problème.....	41
IV. 2. 2. 8 Analyse des résultats.....	41
IV.2.3 Interprétation .....	43
IV. 3 Application N° 2 : Machine asynchrone du problème Workshop 30 avec une modification de la géométrie (modification du rotor). ....	43
IV. 3. 1 Influence des barres d'aluminium au rotor .....	43
IV. 3. 2 Résultats de simulation .....	45
IV. 3. 3 Interprétation .....	46
IV. 4 Application N° 3 : Machine asynchrone à deux pôles. ....	47
IV.4.1 Machine a deux pôles avec une fréquence $f= 60$ Hz.....	49
IV. 4. 1. 1 Résultats de simulation.....	49
IV. 4. 1. 2 Interprétation.....	50

IV.4.1.1.1 Influence du couple résistant.....	50
IV.4.1.1.2 Interprétation.....	53
IV.4. 2 Machine a deux pôles avec une fréquence $f= 50$ Hz.....	53
IV. 4. 2. 1 Résultats de simulation.....	53
IV. 4. 2. 2 Interprétation.....	54
IV. 4. 2. 1. 1 Influence du couple résistant.....	55
IV. 4. 2. 1. 2 Interprétation.....	57
IV. 4. 2. 1. 3 Influence de temps d'imposé un couple résistant.....	57
IV. 4. 2. 1. 4 Interprétation.....	58
IV. 5. Application N° 4 problème de cassure de barre.....	58
IV. 5. 1 Deux barres cassées.....	58
IV. 5. 2 Résultats de simulation .....	58
IV. 5. 3 Interprétation .....	62
VI. 6. Conclusion.....	62

*Introduction*  
*générale*

## Introduction générale

La machine asynchrone est la plus utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Elle est très appréciée dans les milieux industriels par sa robustesse, son couple massique important et son faible coût de revient. Elle apparaît maintenant comme élément de base des actionneurs électriques performants

La recherche actuelle est orientée vers de nouvelles techniques, parmi lesquelles nous avons pris une technique demandée de plus en plus d'importance dans l'industrie, c'est la conception assistée par ordinateur (CAO), cette dernière a été adoptée et confondue à partir des français ; généralement l'existence de l'être humain dans l'industrie exige l'ingénieur comme un cœur de ce objet son oubliant la machine de production et l'ordinateur. On peut aussi dire, la conception assistée par ordinateur est un ensemble d'actions bien définies pour donner des solutions exactes à partir d'un processus itératif à condition dans une durée limitée et rapide.

La simulation numérique est un outil de choix pour arriver à cette fin, car elle permet de minimiser les coûts de développement des prototypes ainsi que leur nombre. Les outils de calcul numérique s'avèrent aussi essentiels dans la conception et l'optimisation des dispositifs industriels. L'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel commercial s'est avérée être une des meilleures solutions.

L'objectif de notre travail est de faire la modélisation des phénomènes électromagnétique et mécanique dans une machine asynchrone. Une modélisation visant le comportement général de la machine en régime dynamique et permanent, mais qui peut servir plus particulièrement le domaine de diagnostic des défauts. Dans ce contexte, nous étudions l'influence des différents paramètres tel que la valeur du couple résistant, l'instant d'imposer cette valeur sur le fonctionnement de la machine.

Dans notre travail, nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis adoptée comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristiques au problème magnétodynamique étudié dans la machine asynchrone proposée.

Ainsi notre travail sera organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre nous donnerons un aperçu bibliographique sur la machine asynchrone d'une manière générale, ainsi que leurs les avantage, les inconvénients et les caractéristiques.

Le deuxième chapitre sera consacré aux formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques.

Le troisième chapitre on s'intéresse dans la première partie à une présentation des méthodes numériques utilisé pour la résolution des équations aux dérivées partielles que nous avons mentionnées dans le chapitre précédent. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du logiciel COMSOL, ainsi que la démarche à suivre pour la modélisation de la machine.

Le quatrième chapitre présentera les résultats des simulations de la modélisation des phénomènes magnétodynamique dans un machine asynchrone, en tient compte l'effet ou l'influence des différents paramètres sur le fonctionnement de la machine.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail et nous proposons quelques perspectives.

# *Chapitre* *I*

## **Généralité Sur la machine asynchrone**

## I. 1 Introduction

La machine asynchrone (MAS), à cause de sa robustesse, est très répandue dans le milieu industriel. Son utilisation classique est avant tout l'entraînement des systèmes à vitesse fixe ou constante. Aujourd'hui, avec le contrôle électronique de la machine lui ouvre un large champ d'utilisation. La MAS n'est plus limitée à des applications à vitesse constante. dans ce chapitre on présentera des généralités sur la machine asynchrone [1].

## I. 2 Généralités sur les machines asynchrones

Historiquement le dix-neuvième siècle fût l'époque des grandes découvertes en Electrotechnique dont les bases fondamentale sont été établies(1820--1830) par des hommes de science parmi lesquels on peut citer, OERSTED, AMPERE, BIOT, SAVART, LAPLACE, OHM, FARADAY; Plus tard en (1873) MAXWELL formalisa les lois de l'électromagnétisme moderne dans son ouvrage fameux; " Treatise on Eelectricity and Magnétisme"[2].

Mais ce n'est qu'à partir de (1870) que l'électrotechnique industrielle s'affirme notamment grâce à la production d'énergie électrique par les génératrices à courant continu (dynamos) de gramme et de siemens. Ensuite, dans les années (1880), furent conçus les alternateurs et les transformateurs polyphasés. Les premiers devaient concurrencer et détrôner les dynamos pour la production de l'électricité, enfin les travaux du yougoslave TESLA et de l'italien FERRARIS complétèrent les systèmes a courants alternatifs polyphasés par la conception et la construction des machines d'induction ou asynchrones en (1888) [2].

Les machines asynchrones couvent actuellement l'essentiel de besoins de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, à titre d'exemple, elles sont utilisées pour la quasi-totalité des fonctions auxiliaires d'une centrale de production électrique; ils sont généralement de même dans les procédés industrielles. L'étude de ces machines acquit donc une grande importance [2].

### **I. 3 Définition**

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales. La vitesse rotorique est toujours en retard par rapport à la vitesse des champs statorique.

La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait par induction électromagnétique [3].

### **I. 4 Description de la machine asynchrone**

La machine asynchrone triphasée est le plus utilisé pour assurer la variation de vitesse et du couple dans les mécanismes industriels. Il est constitué du stator et du rotor avec trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés qui représentent le stator et un autre ensemble de trois enroulements qui sont court-circuités et qui forme le rotor. Et dans une machine asynchrone à cage d'écureuil, les spires au rotor sont constituées par des barres de fer entourant le rotor et formant une cage cylindrique appelée cage d'écureuil. Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation de synchronisme et le rotor tourne à une vitesse plus petite que la vitesse de synchronisme. On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant et ce glissement dépend de la charge [3].

### **I. 5 Utilisation**

#### **I. 5. 1 Moteur asynchrone**

Le moteur asynchrone est le moteur industriel par excellence, les moteurs asynchrones ont, pour leur grande majorité, un rotor à cage. Les progrès accomplis ces dernières années dans l'alimentation et la commande des machines n'ont fait que réduire la part des moteurs asynchrone à rotor bobiné par rapport à leurs homologues à cage d'écureuil [1].

#### **I. 5. 2 Générateur asynchrone**

Le générateur asynchrone est beaucoup plus rare que l'alternateur, mais on le trouve dans quelques applications de puissance limitée comme les microcentrales hydrauliques, il occupe surtout la plus grande part du marché des éoliennes, le plus souvent avec des machines à

cage d'écurie pour les puissances modestes, mais aussi avec des machines à rotor bobiné pour les installations plus importantes [1].

## **I. 6 Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone**

### **I. 6. 1 Les avantages**

Il ya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone : [1]

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse.

### **I. 6. 2 Les inconvénients**

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone : [1]

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).
- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage.

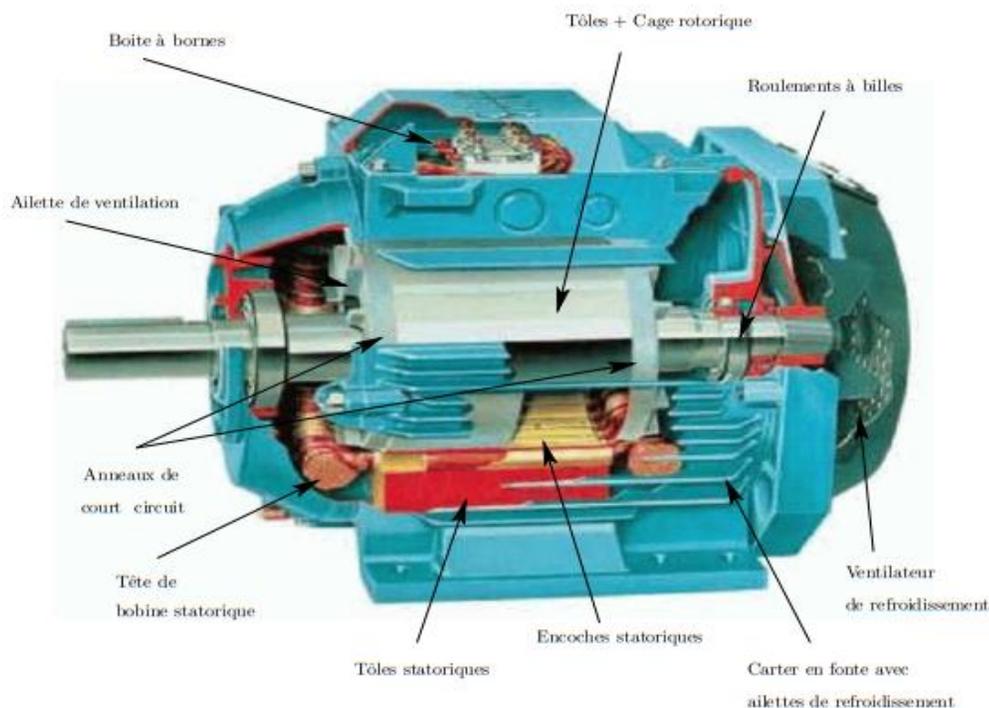
## **I. 7 Mise en œuvre des moteurs asynchrones**

Le moteur asynchrone branché sur le réseau est alimenté à fréquence fixe. Il est alors nécessaire de se préoccuper de son démarrage. Quelques procédés permettent une variation de vitesse, mais avec des performances médiocres. L'utilisation d'un moteur à rotor bobiné apporte plus de souplesse, mais reste une solution réservée à quelques usages particuliers. L'alimentation à fréquence variable par un convertisseur électronique permet d'obtenir d'excellentes performances avec un moteur à cage [1].

## I. 8 Constitution des machines asynchrone

La machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée des principaux éléments suivants : [4]

- Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- Le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté.
- Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles, appelés aussi les paliers.



**Figure I. 1.** Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [4].

### I. 8. 1 Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (**Figure I. 2.**). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs

d'encoches permettent de créer dans l'entrefer, le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [5].

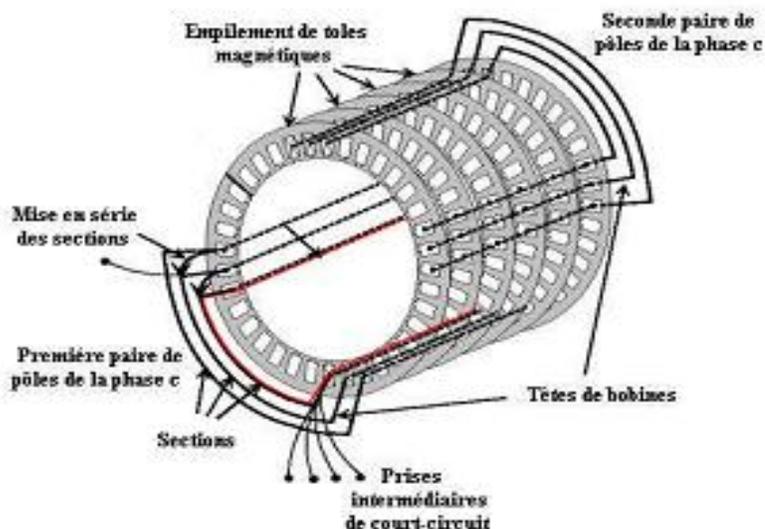


**Figure I. 2.** Stator d'une machine asynchrone [6].

### I. 8. 1.1 Réalisation du bobinage statorique:

Concrètement, le bobinage statorique est réalisé par la mise en série et parallèle de spires élémentaires. L'organisation des spires est faite en fonction de la vitesse, du couple et des tensions d'alimentation désirés de la machine. Comme le montrent les **Figure I. 2.** et **I. 3.** , Pour des raisons techniques de mise en œuvre, et pour limiter les effets pelliculaires, les conducteurs statoriques sont réalisés en fil de cuivre isolé de petite section.

L'isolation est assurée par une résine protectrice dont les qualités d'isolation et de tenue à la chaleur déterminent en grande partie l'utilisation possible de la machine. Dans certaines machines, on peut trouver plusieurs sections par encoche, les sections pouvant appartenir à des phases différentes. Une isolation supplémentaire peut être rajoutée pour améliorer le mur isolant entre les phases. Placé dans les encoches, le bobinage est englué dans un vernis qui le maintient collé, tout en améliorant l'isolation électrique. Une petite cale supplémentaire aide au blocage des conducteurs dans leur encoche. En effet, les efforts mis en jeu (force de Lorentz) peuvent être très importants. Les vibrations des conducteurs et les divers frottements qui en résultent accélèrent l'usure des isolants. Le facteur principal de vieillissement reste cependant la chaleur [7].



**Figure I. 3.** Représentation schématique du stator [7].

Les machines disposent donc généralement d'un ventilateur pour limiter leur montée en température. Placé à une extrémité, ce ventilateur force le passage de l'air entre les ailettes extérieures, ou dans l'entrefer et la carcasse magnétique, pour les grosses machines. Les contraintes sur le bobinage statorique dépendent du type de machine et de son utilisation.

Pour les machines fonctionnant en atmosphère polluée, la poussière et l'humidité se déposant au niveau des têtes de bobines affaiblissent plus particulièrement l'isolation électrique de ces régions. Pour la machine haute tension, c'est à la sortie des encoches que le champ électrique est le plus élevé, en raison de la discontinuité du circuit électrique. D'une façon générale, c'est aussi à la sortie des encoches que les vibrations mécaniques sont les plus contraignantes. [7]

## I. 8. 2 Le rotor

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (**Figure I. 4.**). La cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas du rotor à cage d'écureuil, les conducteurs

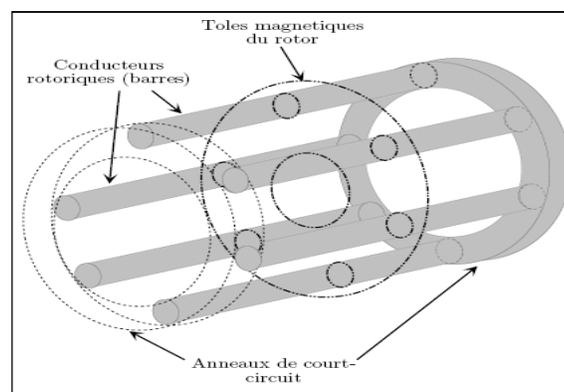
sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre, [8].



**Figure I. 4.** Le rotor à cage [6].

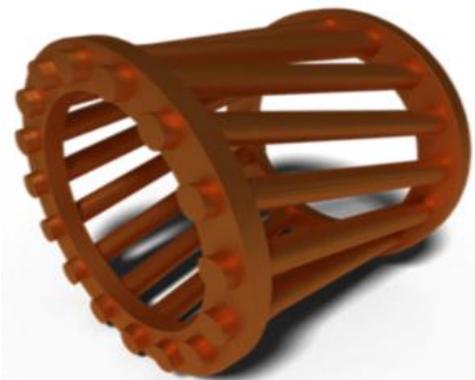
### I. 8. 2. 1 Réalisation du bobinage rotorique

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil (**Figure I. 5.**), les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf peut-être lorsqu'il y a une rupture de barre [9].



**Figure I. 5.** Vue de la cage du rotor [9].

L'intérêt essentiel de ce procédé est la grande robustesse du rotor, une fabrication aisée et un faible coût de réalisation pour des machines sans pratiquement aucun entretien. De plus, pour éviter les harmoniques d'encoches rotoriques, les conducteurs sont inclinés par rapport à l'axe du rotor (**Figure I. 6.**) [9].



**Figure I. 6.** L'inclinaison des barres de rotor [9].

### **I. 8. 3 Les paliers**

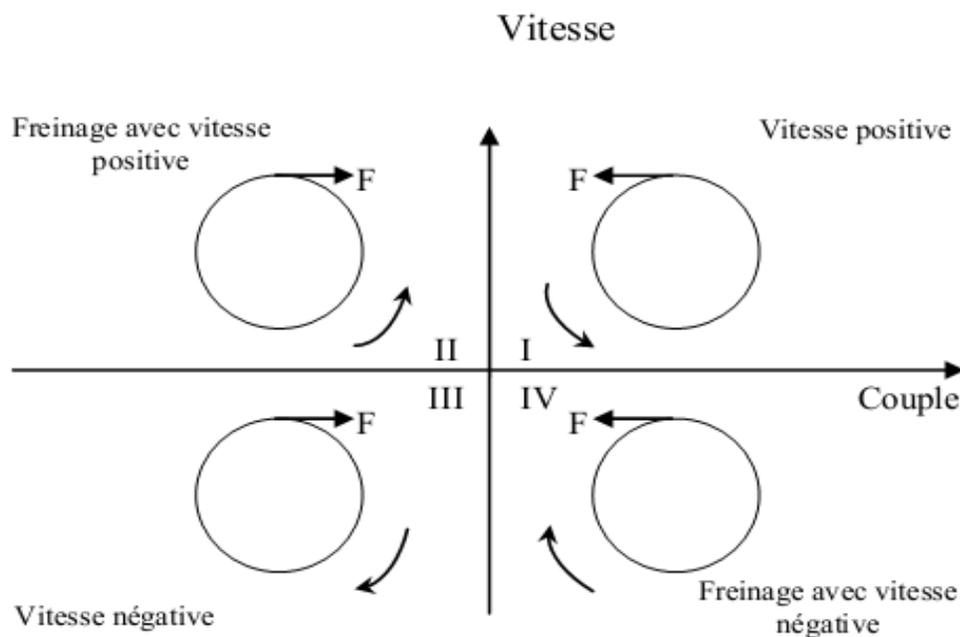
Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil [5].

### **I. 9 Principe de la variation de la vitesse des machines asynchrones**

Les machines synchrones, asynchrones et à courant continu sont naturellement réversibles. Pour bénéficier de cette propriété, il faut que le convertisseur et la source soient également réversibles. Si la source ne l'est pas on ne peut pas récupérer l'énergie lors d'une phase de freinage de la machine mais on peut la dissiper dans des rhéostats (réversibilité dissipatrice) [10].

Le choix d'une structure convertisseur/machine 1, 2 ou 4 quadrants repose exclusivement sur le cahier des charges.

- ✓ Quadrant I seul : la machine ne tourne que dans un seul sens de rotation, le couple est positif ou nul (accélérations contrôlées et décélération non contrôlées) .
- ✓ 2 Quadrants (I et II) : la machine ne tourne que dans un seul sens de rotation, le couple est positif ou négatif (accélérations et décélération contrôlées).
- ✓ 3 Quadrants (I et IV) : la machine tourne dans les deux sens de rotation (pour le sens inverse la charge est nécessairement entraînée), le couple est toujours positif (accélérations contrôlées et décélération non contrôlées).
- ✓ 4 Quadrants (I à IV) : la machine tourne dans les deux sens de rotation quelque soit la charge entraînée le couple est positif ou négatif (accélérations et décélération contrôlées).



**Figure I. 7** Représentation schématique des quatre quadrants du plan vitesse - couple [10].

### I. 10 Réglage de vitesse de la machine asynchrone

Le point de fonctionnement  $(C, \Omega)$  dans le quadrant I en régime établi de l'ensemble machine plus charge se situe à l'intersection des caractéristiques  $C_e = f(\Omega)$  du moteur et  $C_r = f(\Omega)$  de la charge. Le réglage de la vitesse de la machine asynchrone est donc obtenu en

agissant sur le couple qu'elle produit, soit, si l'on se réfère à son expression ci-dessus : le nombre de paires de pôles, la tension d'alimentation de la machine, le glissement ou la fréquence d'alimentation de la machine [10].

### **I. 10. 1 Réglage par variation du nombre de paires de pôles**

Ce genre de réglage consiste à changer le nombre de pôles de la machine en changeant la connexion des enroulements statoriques, ce type de réglage ne peut être utilisé que pour les moteurs ayant la possibilité de changer la connexion de leurs enroulements statoriques, la gamme de vitesse est étroite, une mauvaise souplesse de réglage car les vitesses sont échelonnées [10].

### **I. 10. 2 Réglage par variation de la tension**

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statoriques. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statoriques avec un gradateur triphasé ou une auto transformatrice triphasée [10].

### **I. 10. 3 Réglage par action sur le glissement**

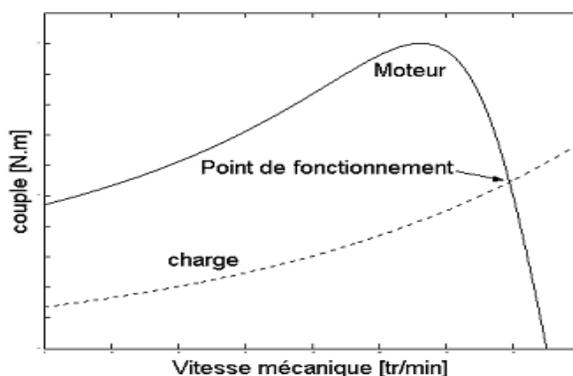
L'utilisation de résistances rotorique permet un réglage de la vitesse au - dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. Avec le développement de l'électronique de puissance, au lieu d'utiliser un rhéostat triphasé, on alimente un redresseur par l'intermédiaire du rotor et la sortie du redresseur alimente un hacheur qui débite sur une charge résistive.

Donc la résistance équivalente de rotor sera en fonction du rapport cyclique de l'hacheur .cette technique reste toujours applicable seulement pour les moteurs asynchrones à rotor bobiné [10].

### **I. 10. 4 Réglage par variation de la fréquence**

La fréquence de rotation du moteur asynchrone est directement proportionnelle à la fréquence de la tension d'alimentation d'où la vitesse de synchronisme. La vitesse d'un moteur asynchrone peut être contrôlée au-dessus et au-dessous de la vitesse nominale en changeant la fréquence de la tension d'alimentation. On essaiera donc de créer pour les enroulements statoriques un réseau à fréquence variable ce sont les onduleurs de tension.

On peut aussi chercher à injecter des courants dans les enroulements pour imposer le couple de la machine ce sont les onduleurs de courant ou commutateurs de courant. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible (de 0 à 1/3 de la fréquence réseau) à l'aide d'un cyclo-convertisseur à commutation naturelle piloté lui aussi en fréquence en courant ou vectoriellement [10].



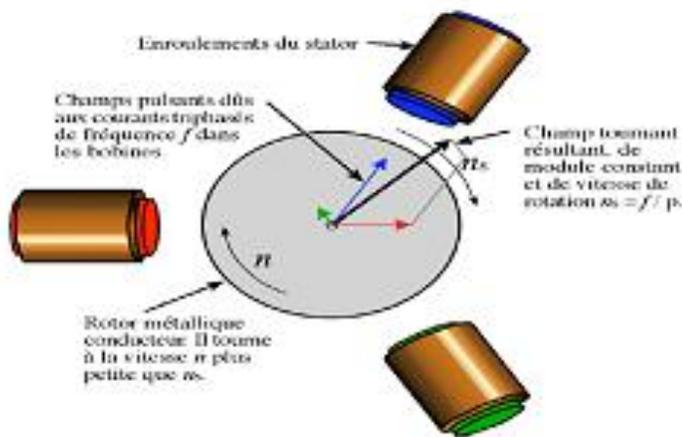
**Figure I. 8.** Représentation schématique du couple en fonction de la vitesse mécanique [10].

### I. 11 Différentes caractéristiques de la machine asynchrone

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique  $B_1$  tournant à la pulsation de synchronisme :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{I. 1})$$

$$\omega_s = 2\pi f \quad (\text{I. 2})$$



**Figure I. 9.** Interaction rotor stator [11].

- Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il tourne à la vitesse de rotation  $\Omega$ .
- Des courants induits circulent dans le rotor.
- L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.
- Glissement.

Le rotor tourne à la vitesse  $\Omega$  plus petite que la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ .

On dit que le rotor glisse par rapport au champ tournant.

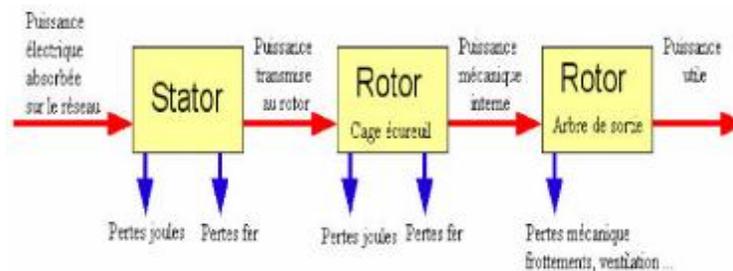
Ce glissement  $g$  va dépendre de la charge [1].

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{I. 3})$$

$$\Omega_s = 2\pi n_s$$

$$\Omega = 2\pi n$$

### I. 12 Diagramme de puissance



**Figure I. 10.** Diagramme des puissances [12].

### I. 13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré des généralité sur les machines asynchrones (constitution, principe de fonctionnement, caractéristique...), en plus on a montré utilisation de ce type de machine et le différent procédés de démarrage.

Dans le chapitre suivant nous présentons les formulations mathématiques des phénomènes électromagnétiques.

*Chapitre*  
*II*

**Formulations Mathématiques**

**Des Phénomènes**

**Electromagnétiques**

## II .1 Introduction

La résolution d'un problème en électromagnétisme consiste à déterminer les structures du champ électromagnétique dans une région de l'espace. Ces configurations du champ doivent satisfaire simultanément les équations du Maxwell, ou les équations des ondes, et des conditions aux limites appropriées des solutions exactes ou analytiques peuvent être obtenus dans un petit nombre de cas selon la géométrie des objets

Hormis une étude expérimental pure, trouver un modèle qui traduit fidèlement un phénomène physique est un préalable à son étude. En ce qui concerne les phénomènes électromagnétiques, James Clark Maxwell les a regrouper, dans quatre équations, en les associent aux équations dites de milieu et de passage, cela permet de modéliser la majorité des systèmes électromagnétiques [11].

## II. 2 Les équations de Maxwell

Les équations de maxwell, aussi appelées équations de Maxwell-Lorentz, sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent les postulats de base de l'électromagnétisme, avec l'expression de La force de Lorentz.

Ces équations traduisent sous forme locale différents théorèmes (Gauss, Ampère, Faraday) qui régissaient l'électromagnétisme avant que Maxwell ne les réunisse sous forme d'équations intégrales. Elles donnent ainsi un cadre mathématique précis au concept fondamental de champ introduit en physique par Faraday dans les années 1830. [13]

Ces équations montrent notamment qu'en régime stationnaire, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un de l'autre, alors qu'ils ne le sont pas en régime variable.

Dans le cas le plus général, il faut donc parler du champ électromagnétique, la dichotomie électrique/magnétique étant une vue de l'esprit. Cet aspect trouve sa formulation définitive dans le formalisme covariant présenté dans la seconde partie de cet article : le champ électromagnétique y est représenté par un être mathématique unique : le tenseur électromagnétique, dont certaines composantes s'identifient à celles du champ électrique et d'autres à celles du champ magnétique.[13]

### II.2.1. Equation de Maxwell-Faraday

Un champ électrique peut induire un champ magnétique. Ce champ induit est utilisé dans de nombreux générateurs électriques. Un aimant permanent en rotation qui crée un champ magnétique en mouvement, génère un champ électrique dans un fil à proximité [1].

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

### II.2.2. Equation de Maxwell-Ampère

Les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières: par la variation d'un champ électrique ou par les courants électriques [11].

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

### II.2.3. Equation de conservation de flux magnétique

Divergence de l'induction magnétique

$$Div \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

Cette relation traduit mathématiquement, qu'il n'existe pas de charges magnétiques car les seules sources de champ magnétique sont les courants électriques. C'est pourquoi les lignes du champ sont toujours fermées sur elles-mêmes, elles forment des boucles. Ces boucles n'ont, ni points de départ, ni points d'arrivées, ni points de convergences, D'où, la nomination d'induction conservative (champ conservatif) .[13]

## II.2.4. Equation de Maxwell-Gauss

Un champ électrique est généré par des charges électriques. Le champ électrique est orienté à partir des charges positives vers les charges négatives. Plus précisément, cette loi relie le flux électrique à travers n'importe quelle surface de Gauss fermée [1].

$$\text{Div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

## I. 3 Loi de comportement des matériaux (milieux physiques)

Au système d'équations de Maxwell il fallait introduire des relations traduisant le comportement physique du milieu [14].

- **Induction et champ électrique**

Pour tout champ électrique, dans un milieu isotrope, de permittivité  $\epsilon$ , nous avons [14]

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

où :

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

Cette relation décrit la relation entre le vecteur induction électrique  $\vec{D}$  et le vecteur champ électrique  $\vec{E}$ . Elle est linéaire si  $\epsilon$  est constante.

Dans le cas des conducteurs non polarisés, nous avons:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$$

Avec:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36 * \pi * 10^9}$$

- **Induction et champ magnétiques**

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

avec:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

Dans le cas d'un aimant permanent, nous avons:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_{re} \quad (\text{II.7})$$

$\vec{B}_{re}$  : Vecteur induction magnétique rémanente [14].

## I. 4 Formulation des équations électromagnétiques

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier aux seins Des dispositifs électrotechniques sont régis par les quatre équations aux dérivées partielles de MAXWELL et par les trois relations du milieu considéré. Nous disposerons alors du système des sept équations. Ces équations décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais suivants les dispositifs que l'on étudie, certains phénomènes deviennent négligeables; les équations se découpent alors, en donnant naissances à des modèles plus simples [14].

### II. 4. 1 Modèle Electrostatique

Dans ce modèle la répartition des charges électriques ne dépend pas de temps (régime stationnaire : cas de courant continu) de ce faite le champ magnétique crée ne varie pas dans le temps [13]:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Les équations de ce modèle se simplifient comme suit :

$$\text{Div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.9})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = 0 \quad (\text{II.10})$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.11})$$

La relation (II-12) permet de définir une fonction potentiel scalaire électrique V, telle que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II.12})$$

Le modèle se ramène alors à l'équation

$$\text{div}(\overline{\epsilon \text{grad} V}) + \rho = 0 \quad (\text{II.13})$$

## II. 4. 2 Modèle Electrocinétique

Ce type de problèmes concerne l'étude de la répartition des courants dans des conducteurs hétérogènes (connexion, jeu de barres, contact...) soumis à des tensions continues.

Le terme  $(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t})$  reste nul Ce modèle régit par les équations suivantes [13] :

$$\overline{\text{rot} \vec{E}} = 0 \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Div} \vec{J} = 0 \quad (\text{II.15})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.16})$$

L'équation (II, 16) implique que le champ électrique dérive d'un potentiel scalaire  $V$ :

$$\vec{E} = -\overline{\text{grad} V} \quad (\text{II.17})$$

On trouve :

$$\vec{J} = -\sigma \overline{\text{grad} V} \quad (\text{II.18})$$

Injectant cette dernière équation dans l'équation (II.27) , on aboutit alors à l'équation globale

du modèle :

$$\text{div}(-\sigma \overline{\text{grad} V}) = 0 \quad (\text{II.19})$$

## II. 4. 3 Modèle Magnétostatique

### II. 4. 3. 1 Modèle magnétostatique scalaire

Dans ce modèle on admet que les courants électriques sont négligeables dans la pièce à étudier, et que le champ magnétique ne dépend pas de temps [13]

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.20})$$

On aboutit aux relations suivantes :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{0} \quad (\text{II.21})$$

$$Div \vec{B} = \vec{0} \quad (\text{II.22})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_{re} \quad (\text{II.23})$$

Dans ce cas le champ dérive d'un potentiel magnétique scalaire ( $\phi$ ):

$$\vec{H} = -\sigma \overrightarrow{grad} \phi \quad (\text{II.24})$$

Les équations de ce modèle sont regroupées pour former l'équation globale suivante :

$$div(\mu \overrightarrow{grad} \phi) = Div \vec{B}_{re} \quad (\text{II.25})$$

#### II. 4. 3. 2 Modèle magnétostatique vectorielle

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  est alors nul et les champs électrique  $\vec{E}$  et Magnétique  $\vec{B}$  sont découplés par contre, on désire modéliser un objet parcouru par des courants non nuls On obtient alors les équations suivantes [13] :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.26})$$

$$Div \vec{B} = \vec{0} \quad (\text{II.27})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_{re} \quad (\text{II.28})$$

La relation  $Div \vec{B} = \vec{0}$  permet de définir une fonction vectoriel  $\vec{A}$  appelée potentiel vecteur magnétique, tel que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (\text{II.29})$$

Pour que cette fonction soit totalement définie, il faut également fixer sa divergence, on ajoute alors la condition (II.27)

Cette condition est appelée JAUGE DE COULOMB

D'où le système d'équation est :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \right) = \vec{j} + \overrightarrow{\text{rot}} \left( \frac{1}{\mu} \vec{B}_{re} \right) \quad (\text{II.30})$$

#### II. 4. 4 Le Modèle magnétodynamique

Contrairement aux autres modèles le terme  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  n'est pas nul Par conséquent les phénomènes magnétiques et électriques sont couplés, c'est-à-dire que la variation de champ magnétique dans le temps induit des courants de Foucault et des f.e.m ce qui est le cas de tous les dispositifs dans lesquels les courants et les tensions électriques ne sont pas stationnaires.

Le potentiel vecteur  $\vec{A}$  Joue un rôle primordial dont la connaissance  $\vec{A}$  implique la connaissance de tous les grandeurs physiques où (II.29).

En termes d'équations nous avons :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.31})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.32})$$

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A} \quad (\text{II.33})$$

A ces équations nous ajoutons les lois caractéristiques au milieu

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.34})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.35})$$

C'est à partir de ces équations de base de ce modèle que nous pouvons déterminer l'équation décrivant l'évolution des phénomènes électromagnétiques dans un dispositif où l'ensemble des champs présents sont en fonction explicite de l'espace et du temps .L'utilisation de ce modèle est très répondeue dans l'étude des machines électriques, des dispositifs du chauffage par induction, des transformateurs ...etc [13].

### II. 4. 4. 1 Formulation de L'équation Magnétodynamique

On se basant sur les équations de J.C.MAXWELL, on peut formuler l'équation qui décrit l'évolution spatiale-temporelle des phénomènes électromagnétiques nous avons : [13].

D'après les équations (II.31) et (II.33)

On obtient :

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \overrightarrow{rot} \vec{A}}{\partial t} = \overrightarrow{rot} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{II.36})$$

$$\overrightarrow{rot} \left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{II.37})$$

Ceci implique  $\left( \vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right)$  un champ conservatif, il dérive donc d'un potentiel scalaire électrique U Tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{grad} U \quad \rightarrow \quad \vec{E} = -\left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \overrightarrow{grad} U \right) \quad (\text{II.38})$$

A partir de l'équation (II.38) nous avons :

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{B} \right) = \vec{j} \quad (\text{II.39})$$

Et à partir des équations (II.37) et (II.40) nous avons :

$$\overrightarrow{rot} \left( \frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \overrightarrow{grad} U - \sigma (\nabla \wedge \overrightarrow{rot} \vec{A}) = \vec{j}_{ex} \quad (\text{II.40})$$

On ajoute alors la condition  $Div \vec{A} = 0$  appelée JAUGE DE COULOMB

Dans le cas où la pièce est immobile par rapport à l'inducteur et v est uniformément nul

l'équation (II.40) devient

$$\overrightarrow{rot} (\nabla \wedge \overrightarrow{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{j}_{ex} \quad (\text{II.41})$$

## II. 5 Application des équations de Maxwell à la machine asynchrone à cage

En toute rigueur, tout système électromagnétique est tridimensionnel (3D). Mais les dispositifs électrotechniques classiques privilégient généralement une direction particulière des champs ou des courants : une connaissance précise de la grandeur étudiée dans le plan privilégié associé à une approximation dans la direction orthogonale conduit à l'étude d'un système bidimensionnel (2D) dans le cadre de cette formulation magnétodynamique en cartésien (2D) et en supposons le système étudié excité à partir d'une densité de courant  $\vec{J}_z$  dirigé selon l'axe (oz) « il en sera de même pour le potentiel magnétique  $A_z$  qui sera un scalaire », les équations de Maxwell conduisent finalement à [1]:

$$\frac{1}{\mu} \overrightarrow{\text{rot}} (\overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J} \quad (\text{II.42})$$

## II. 6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté, les formulations mathématiques ainsi que les différents modèles régissant les phénomènes électromagnétiques.

Dans le chapitre suivant nous présentons les différentes méthodes numériques utilisées pour résoudre les opérations aux dérivées partielles (EDP).

*Chapitre*  
*III*

**Méthodes numériques et logiciel**

**COMSOL-Multiphysics**

## III. 1 Introduction

L'objectif principal de cette simulation est d'étude de la machine asynchrone. L'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel COMSOL Multiphysics s'est avérée être une des meilleures solutions, la méthode des éléments finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème.

## III. 2 Différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles

Il existe deux grandes catégories de méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles mathématiques caractérisant les problèmes physiques, lorsqu'il s'agit de calculer des effets dont les causes (densité du courant (tension), densité de la puissance dissipée) sont connues à l'avance. Ces méthodes sont :

- Les méthodes analytiques et les méthodes des intégrales (semi analytique).
- Les méthodes numériques.

Les méthodes analytiques, s'avèrent d'application très difficile dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux, dans des conditions de fonctionnement optimales, présentent des non-linéarités physiques, donc mathématiques. L'apparition des ordinateurs, de grandes puissances, a mis en valeur l'intérêt des méthodes dites numériques. Celles-ci font appel à des techniques de discrétisation. Ces méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles (EDP) à des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en différenciant points situés aux nœuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation [17].

### III. 2. 1 Méthode analytique

#### III. 2. 1. 1 La méthode de séparation des variables

C'est la méthode la plus utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles, le principe de cette méthode consiste à mettre l'inconnue sous forme d'un produit des fonctions, dont chacune ne dépend que d'une seule variable [21].

## III. 2. 2 Méthodes des intégrales (semi analytique)

### III. 2. 2. 1 Méthode des intégrales de frontières (MIF)

C'est la dernière-née des méthodes numériques en électrotechnique, elle consiste à ramener le problème sur les frontières du domaine d'étude, donc on n'a pas à mailler à l'extérieur du dispositif. Ceci représente un gain considérable en nombre de variables à calculer.

La méthode (MIF) est basée sur une transformation de Green qui permet de ramener la résolution du domaine d'étude vers la frontière.

Cette méthode trouve son application lorsque les fréquences de travail sont très importantes car la profondeur de pénétration devient très faible vis-à-vis des autres dimensions géométriques du dispositif étudié et une discrétisation en éléments finis ferait aboutir à des difficultés insurmontables à cause du grand nombre d'éléments nécessaires à cette discrétisation [23].

### III. 2. 2. 2 Méthode des circuits couplés (MCC)

La MCC permet de fournir la solution d'une EDP par une expression intégrale du type loi de BIOT et SAVARD. Dans ce cas, on associe à la forme intégrale de la solution, une subdivision de l'inducteur en spires élémentaires.

En appliquant les lois de KIRCHOFF à ces circuits élémentaires, on aboutit à un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des densités du courant. La MCC peut être couplée à une méthode numérique de discrétisation type MEF ou MDF de la charge. [14].

## III. 2. 3 Méthodes numériques

Ce sont des méthodes basées sur la discrétisation du domaine d'étude.

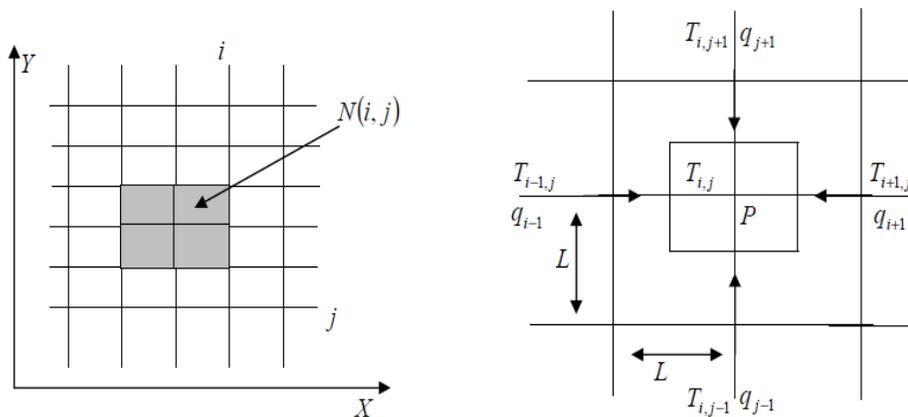
### III. 2. 3. 1 Méthode des différences finies (MDF)

C'est les méthodes la plus ancienne, connue depuis Gauss. Le principe fondamental de cette méthode consiste à appliquer au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse permet de donner une bonne approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement limité en série de Taylor de la fonction à déterminer dans chaque nœuds du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équation algébrique égale au nombre des valeurs

d'inconnues des grandeurs étudiées. La solution par une des méthodes connues permet la connaissance, en chaque maille du domaine, la valeur de la variable étudiée.

Cependant, les méthodes utilisées dans la résolution des systèmes d'équation issue des méthodes des différences finies ne s'adaptent pas très bien la modélisation de système de forme complexe et sont toujours obérée par la nécessité de prendre en compte les conditions d'interfaces. Elle est petit à petit supplantée par la méthode d'éléments finis.

Pour un problème plan, un élément de coque par exemple avec source volumique de chaleur  $p$ , la température en chacun des nœuds  $N(i, j)$  est  $i, j$  l'épaisseur étant unitaire, est  $L$  un petit volume, représenté figure suivante : [20]



**Figure III. 1.** Description d'un différence finies un deux dimension

### III. 2. 3. 2 Méthode des volumes finis (MVF)

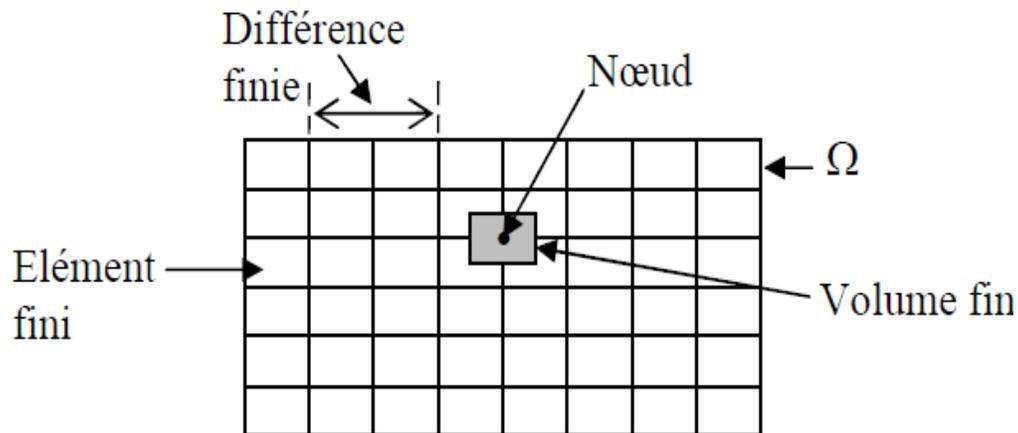
La MVF se déduit de la MDF. Le domaine d'étude ( $\Omega$ ) est subdivisé en un nombre d'éléments finis. Chaque élément contient quatre nœuds, pour le cas bidimensionnel axisymétrique, un volume fini entoure chaque nœud.

L'équation différentielle est projetée sur une fonction de projection bien déterminée et ensuite intégrée dans chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale dans le volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, puissance, exponentielle, ...etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude.

L'équation discrétisée de cette façon exprime le principe de conservation pour l'inconnu dans l'élément de volume et la solution obtenue est constituée uniquement par les valeurs nodales.

Cette méthode est utilisée, en particulier en mécanique des fluides (l'équation d'écoulement), où elle est apparue depuis une vingtaine d'années, sa procédure donne une solution plus précise que celle fournie par la MDF.

L'équation discrète obtenue exprime le principe de conservation de la fonction sur le volume de contrôle. [16]



**Figure III. 2.** Maillage du domaine d'étude

### III. 2. 3. 3 Méthode des éléments finis (MEF)

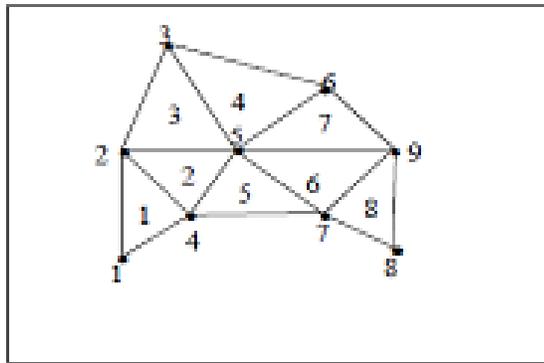
La méthode des éléments finis est plus générale car elle est mieux adaptée aux géométries complexes et aux matériaux non linéaires.

Dans cette méthode on cherche à exprimer une formulation intégrale basée sur l'une des deux approches suivantes :

- La méthode variationnelle qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement, l'énergie du système étudié. Cette méthode n'est donc applicable que si on connaît une fonctionnelle équivalente au problème différentiel que l'on veut résoudre.
- La méthode des résidus pondérés ou méthode projective qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue.

La méthode des éléments finis consiste à subdiviser le domaine d'étude en domaines élémentaires appelés éléments finis, à exprimer l'inconnue sur chaque élément par les fonctions d'interpolation simples en fonction des valeurs de l'inconnue en chacun des sommets de cet élément. L'inconnue devra vérifier globalement les conditions de continuité à l'interface et au passage d'un milieu à un autre. Pour des structures bidimensionnelles, les éléments de maillage sont souvent des triangles, tandis que dans les problèmes tridimensionnels, les éléments sont de forme tétraédrique ou prismatique.

L'avantage de s'adapter aux géométries complexes et la prise en considération des non linéarités ont fait que la méthode des éléments finis soit très utilisée en électromagnétisme bien qu'elle soit quelque peu difficile à mettre en œuvre puisqu'elle requiert une grande capacité de mémoire et un temps de calcul important.[18]



**Figure III. 3.** Un domaine d'étude discrétisé en Elément finis [18]

### III. 2. 3. 3. 1 Démarche éléments finis

Voici les principales étapes de la construction d'un modèle éléments finis [19] :

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines.
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine.
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème.
- Assemblage des matrices élémentaires.
- Prise en compte des conditions aux limites.
- Résolution du système d'équations.

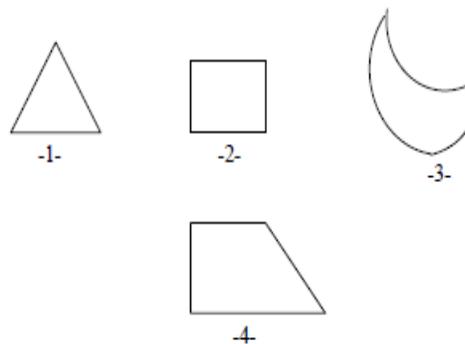
### III. 2. 3. 3. 2 Maillage élément finis

Consiste à découper la géométrie en un nombre fini du domaine (domaine élémentaires).

Il existe différents types d'éléments : [21]

- Élément linéique (1D).
- Élément surfacique (2D).
- Élément volumique (3D).

Pour les structures en (2D) les éléments de maillage sont souvent des triangles mais il peut être aussi en d'autre forme, les formes possible dans ce cas sont les suivantes:



**Figure III. 4.** Les formes possibles des éléments élémentaires en (2D).

### III. 2. 3. 3. 3 Les avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis

#### A- Les avantages

- Adaptation aux géométries complexes.
- Prise en compte des non linéarités accrues.

#### B- Les inconvénients

- Mise en œuvre relativement difficile.
- Prise en considération de domaines infinis.
- Présence de singularités dans le domaine d'étude.
- Temps de calcul relativement important.

### III. 3 Description du logiciel «COMSOL MULTIPHYSICS»

Le logiciel COMSOL Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis.

Développé initialement comme une TOOLBOX de MATLAB, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement.

Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes Multi physiques, particulièrement adapté au micro-onde [19].

Il a été retenu pour les raisons suivantes :

- Il est spécialisé dans la résolution de problèmes électromagnétiques,
- Il permet de prendre en compte la présence de plusieurs diélectriques,
- Il permet de modéliser une surface conductrice de faible épaisseur (couche de pollution),
- Il permet de travailler en régime statique ou quasi-statique (50 Hz)
- enfin, il permet une modélisation rapide du problème.

#### III. 3. 1. Introduction à l'interface de logiciel COMSOL 5.2a

L'interface de COMSOL 5.2a peut être composée en quatre parties qui sont présentés dans la figure III .5

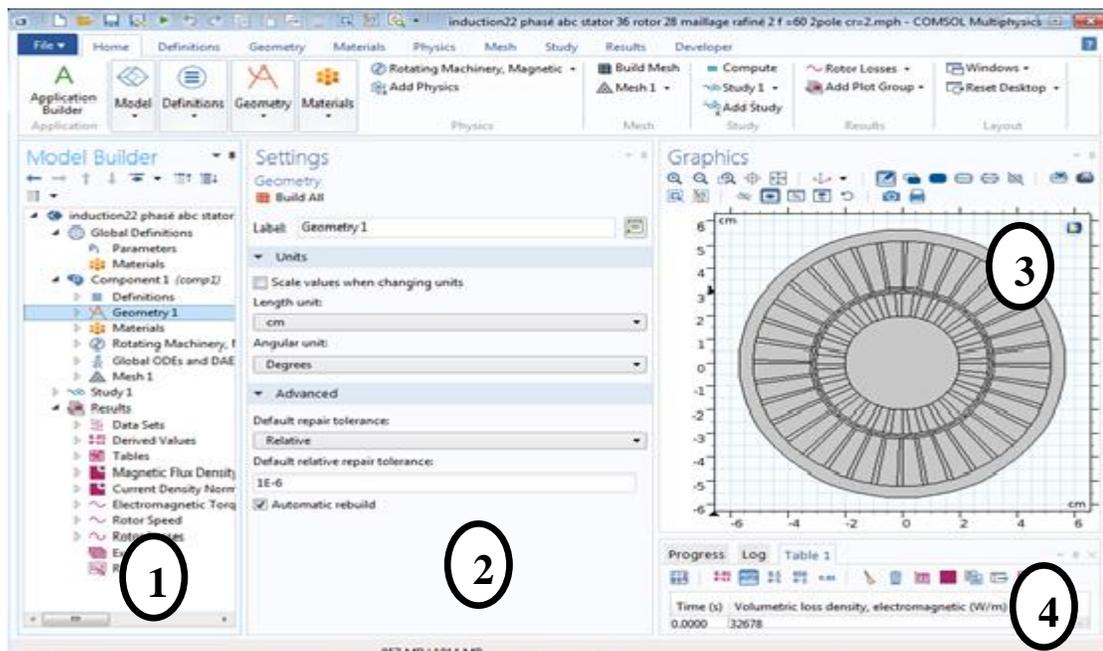


Figure III. 5. Interface utilisateur de COMSOL 5.2a

À gauche, on trouve le **Model Builder** ① dans lequel est défini le problème à étudier. Dans le détail, le menu *Global Definitions* regroupe notamment les variables et paramètres du problème. Dans le menu *Component 1* sont définis le système de coordonnées (*Définitions*) par défaut le système cartésien, la géométrie (*Geometry*), les matériaux (*Materials*), la ou les physique(s) appliquées au problèmes et le maillage (*Mesh*). Le menu suivant *Study 1* permet de définir les paramètres de résolutions, stationnaire ou dépendant du temps, ainsi que les options du solveur. Finalement, le menu *Results* regroupe l'ensemble des options de post-traitement des données.

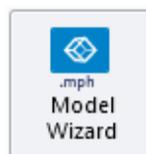
La colonne directement à droite **Settings** ② permet d'entrer les données relatives aux options sélectionnées dans le *Model Builder*. Par exemple, les dimensions de l'objet créé dans *Geometry*. C'est aussi dans cette fenêtre que les valeurs initiales et les conditions frontières de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis.

En haut à droite, l'interface d'affichage graphique **Graphics** ③ permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se trouvent les options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, cacher certains éléments, etc. Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre.

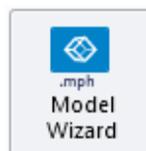
Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, une fenêtre ④ permet de visualiser les éventuels messages d'erreurs, la progression des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée.

### III. 3. 2. Création du page de simulation

① Ouvrez une nouvelle simulation COMSOL, sélectionnez *Model Wizard*. Cette option permet de définir pas à pas les modalités du problème.

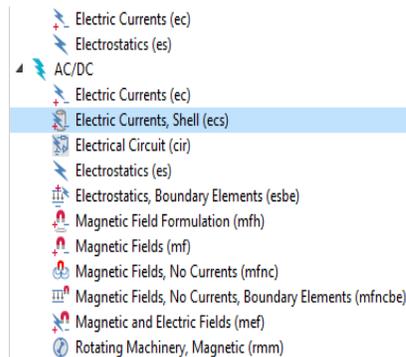


② Choisissez ensuite un modèle spatial en 2D.



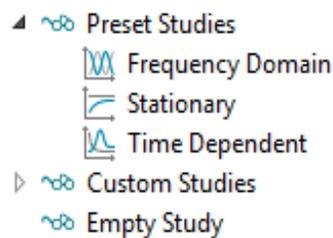
③ Vous devez par la suite choisir le modèle physique approprié. Sélectionnez le modèle *Transport in Diluted Species (tds)* dans la catégorie *Chemical Species Transport*. Cliquez sur *Add*

puis sur 



④ Après avoir sélectionné le modèle, vous devez sélectionner le type d'étude désiré. Sous *Preset Studies*, choisissez le cas d'étude en régime permanent (*Time Dependent*), puis cliquez sur

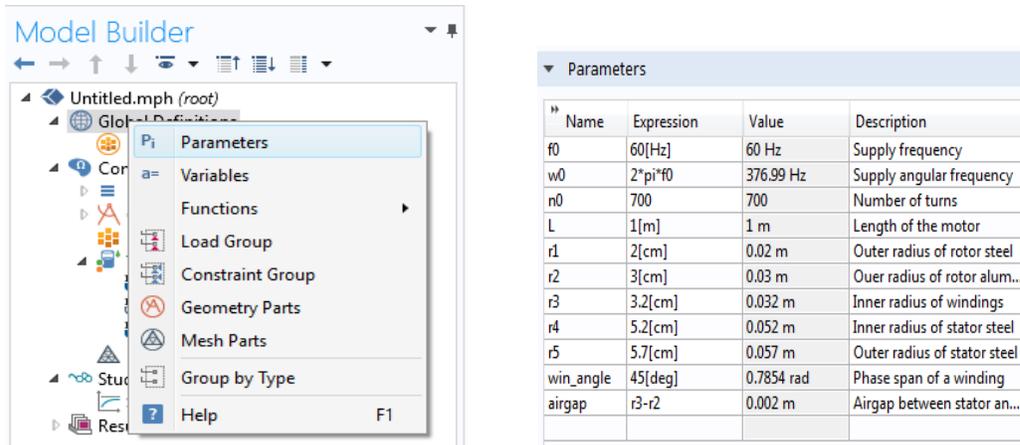




**Sauvegardez** la simulation dans votre répertoire personnel.

### III. 3. 3. Définition des paramètres globaux et création de la géométrie

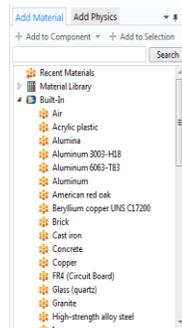
Dans le *Model Builder*, faites apparaître le menu contextuel (clic droit de la souris) de *Global Definitions* et cliquez sur *Parameters*. Lorsque vous définissez une nouvelle variable, il est possible et **fortement conseillé** de lui associer une unité. Les unités doivent être mises entre crochets.



**Figure III. 6** Ajout de paramètres au modèle. **Figure III. 7** : Paramètres du modèle

### III. 3. 4. Affectation des propriétés du matériau

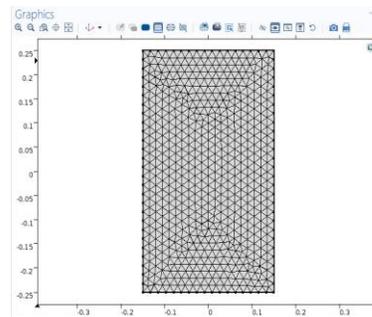
Pour ajouter le matériau, cliquez droit sur le sous-menu *Material* disponible dans *Component1*. Sélectionnez *Add Material*, une nouvelle fenêtre apparaît à droite pour choisir parmi une liste de matériaux.



**Figure III .8.** Les matériaux

### III. 3. 5. Maillage

Cliquez sur *Mesh* et choisissez comme taille de maillage *Finer*, laissez le maillage défini en tant que *Physicscontrolled mesh*. Cliquez sur **Build All**



**Figure III. 9.** Maillage

### III. 3. 6. Simulation et traitement des résultats

Pour effectuer la simulation, cliquez sur *Study* dans le *Model Builder* puis sur *.* COMSOL se chargera de choisir les paramètres du solveur en fonction des modèles physiques choisis. Si vous désirez changer les paramètres du solveur, ces derniers sont accessibles à partir de l'onglet *Study*, mais cela n'est pas nécessaire dans le cadre de ce tutoriel.

### III. 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de résolution des équations aux dérivées partielles. Ensuite, nous avons donné une introduction sur le logiciel COMSOL-Multiphysics 5.2a. Par ailleurs, le prochain chapitre sera consacré, aux résultats de simulation obtenus par COMSOL-Multiphysics 5.2a pour différents machines asynchrones.

*Chapitre*  
*IV*

**Application et validation**

## IV.1 Introduction

Le chapitre suivant a pour objectif de modéliser le comportement magnétodynamique d'une machine asynchrone. Les résultats de simulations à caractère électrique, magnétique et mécanique seront largement présentés. Ces résultats sont obtenus à partir du logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis adopté comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristique au problème traiter. L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier l'influence des différents paramètres tel que la valeur du couple résistant, l'instant d'imposer cette valeur, et en fin nous étudions le problème de cassure de barre.

## IV.2 Application N° 1 : Problème Workshop 30

### IV. 2. 1 Description du système

Le problème que nous allons étudier consiste à la résolution de l'équation du modèle magnétodynamique et l'équation mécanique dans une configuration en bidimensionnelle. L'application traitée est une machine asynchrone mentionnée comme un problème workshop 30 pour valider notre travail. Les dimensions de cette machine sont données dans le tableau. VI. 1 et la géométrie est illustré dans la figure IV.1.

Le mouvement de rotation du rotor est donné par l'équation IV. 1 et IV. 2. Pour résoudre ces deux équations nous utilisons deux options qui offrent l'interface de logiciel COMSOL, il s'agit de 'ODE global' et 'DAE'. Ces deux options sont basées sur la méthode des éléments finis comme une méthode de résolution des équations aux dérivées partielles. Cependant, cette méthode est sensible à la taille du maillage. Il est nécessaire de raffiné le maillage pour aboutir des résultats précises.

$$\frac{dw_m}{dt} = \frac{T_m - T_L}{J} \quad (\text{IV. 1})$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = w_m \quad (\text{IV. 2})$$

$T_m$  est le couple moteur,  $T_L$  est le couple de charge,  $w_m$  la vitesse angulaire du moteur et  $\varphi$  est l'angle du rotor.

L'approche alternative utiliser pour calculer le couple est la méthode d'Arkko qui est basé sur l'intégration volumique du produit des densités de flux magnétique. Dans cette méthode, le couple électromagnétique est exprimé par l'équation IV. 3.

$$T_m = \frac{1}{\mu_0(r_o - r_i)} \int_S r B_r B_\theta ds \quad (\text{IV. 3})$$

$r_o$  est le rayon extérieur,  $r_i$  est le rayon intérieur, et  $S$  est la section transversale de l'entrefer.

La densité de flux magnétique dans les directions radiale et azimutale est respectivement  $B_r$  et  $B_\theta$ .

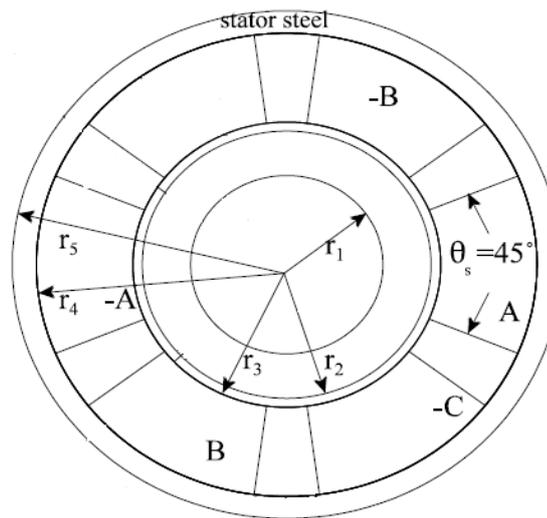


Figure IV. 1. Moteur à induction triphasé [17]

Name	Expression	description
f 0	60[Hz]	Fréquence l'alimentation
w0	2*pi*f0	La fréquence angulaire
r 5	5.7[cm]	Rayon extérieur de l'acier du stator
r 1	2[cm]	Rayon extérieur de l'acier du rotor
r 2	3[cm]	Rayon extérieur de l'aluminium du rotor
n 0	2045	Nombre de tours
L	1[m]	La longueur du moteurs
r 3	3.2[cm]	Rayon intérieur de l'enroulement
r 4	5.2[cm]	Rayon intérieur de l'acier du stator
Ia	1[A]*sqrt(2)*cos(w*t)	Current on phase A
Ib	1[A]*sqrt(2)*cos(w0*t+120[deg])	Current on phase B
Ic	1[A]*sqrt(2)*cos(w0*t-120[deg])	Current on phase C

Tableau IV. 1. Dimensions et paramètres de la machine (problème Workshop 30).

## IV. 2. 2 Étapes de résolution du problème

### IV. 2. 2.1 Choix du modèle

Nous allons commencer par le choix du modèle. Lancez donc le module magnétodynamique dans le navigateur de modèle. Nous avons opté une étude en 2D.

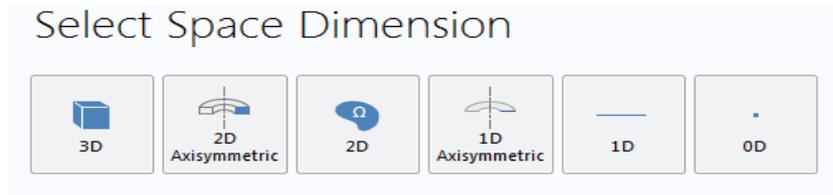


Figure IV. 2 Choix de la dimension.

### IV. 2. 2. 2 Choix des modules

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparait. C'est lui que permettra de spécifier les modèles physique qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie. Pour chaque modèle, il faut préciser quelles sont les variables propres à ce modèle.

- ▷ Rotating Machinery, Magnetic (*rmm*)
- ▷ Global ODEs and DAEs (*ge*)

Figure IV. 3. Les modules étudiés

### IV. 2. 2. 3 Choix du type d'étude : Stationnaire, temporelle, fréquentielle.

Dans cette étape, nous choisissons le régime temporelle parmi les modes excités fréquentielle et stationnaire parce que nous sommes intéressé dans notre travail au modèle magnétodynamique qui régit par les équations de Maxwell présentés ci-dessous.

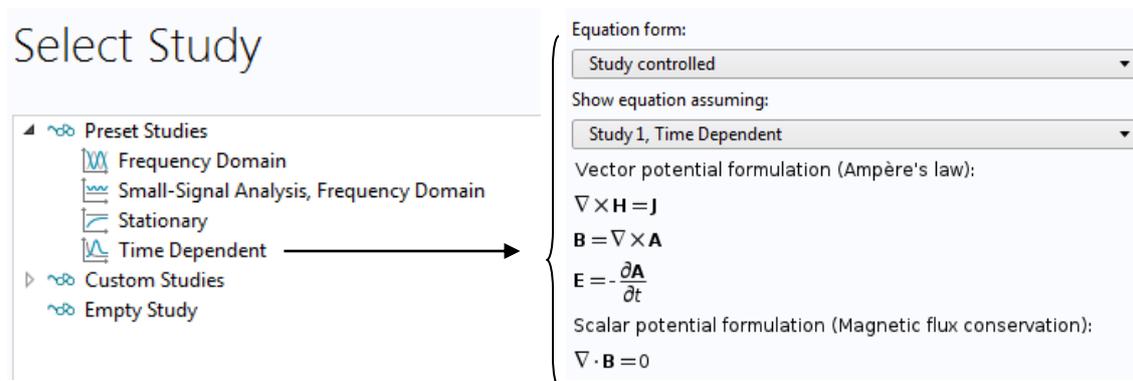
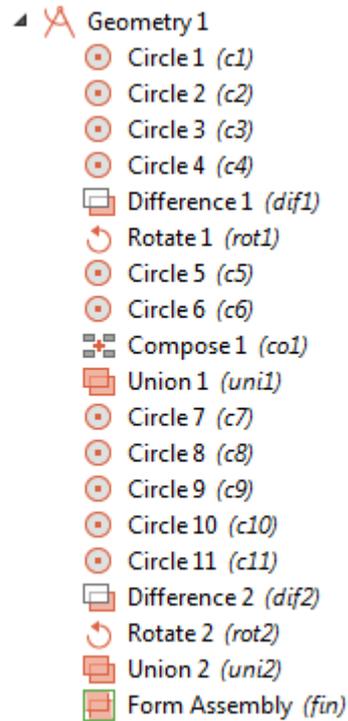


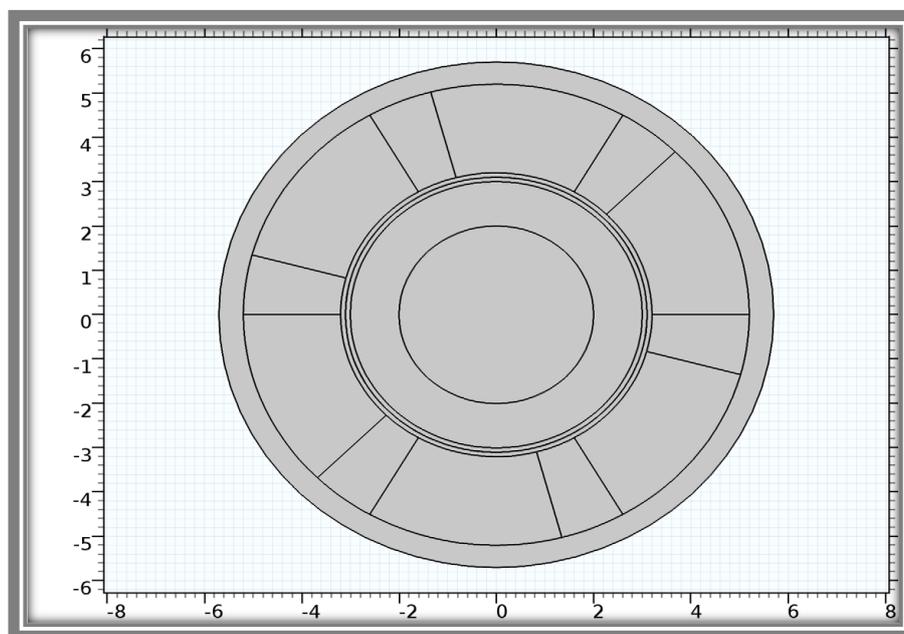
Figure IV. 4. Choix du régime temporelle

#### IV. 2. 2. 4 Construction de la géométrie

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système (La machine asynchrone mentionné comme problème workshop 30).



**Figure IV. 5.** Les étapes à suivre dessiné la géométrie de la machine.



**Figure IV. 6.** La géométrie de la machine asynchrone étudiée.

#### IV. 2. 2. 5 Introduction des propriétés des domaines

Le but ici est de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine d'étude : la conductivité électrique, la perméabilité magnétique etc. Les paramètres sont évidemment liés à notre modèle physique étudié.

Pour résoudre les EDP, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites. A chaque frontière de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système.



Figure IV. 7. Propriétés des domaines.

#### IV. 2. 2. 6 Paramétrage et calcul du maillage

Le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée.

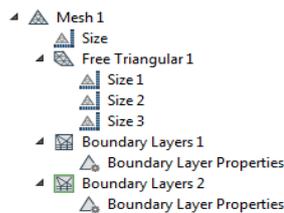


Figure IV. 8. Les étapes à suivre pour faire le maillage.

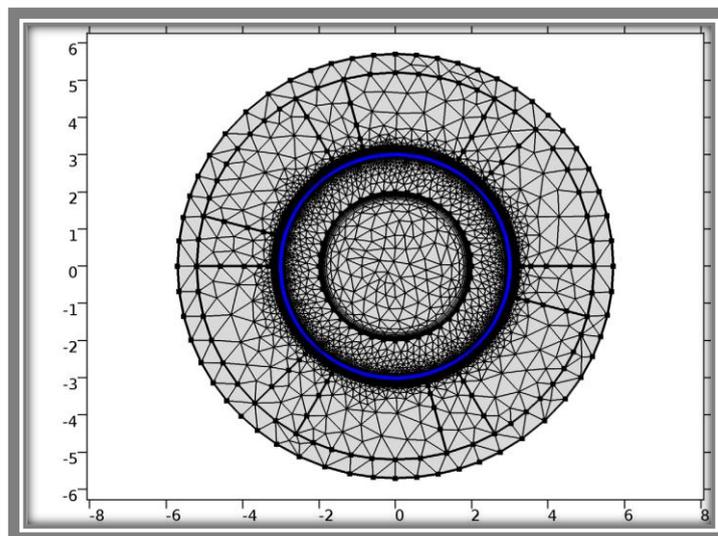


Figure IV. 9. Le maillage du domaine d'étude.

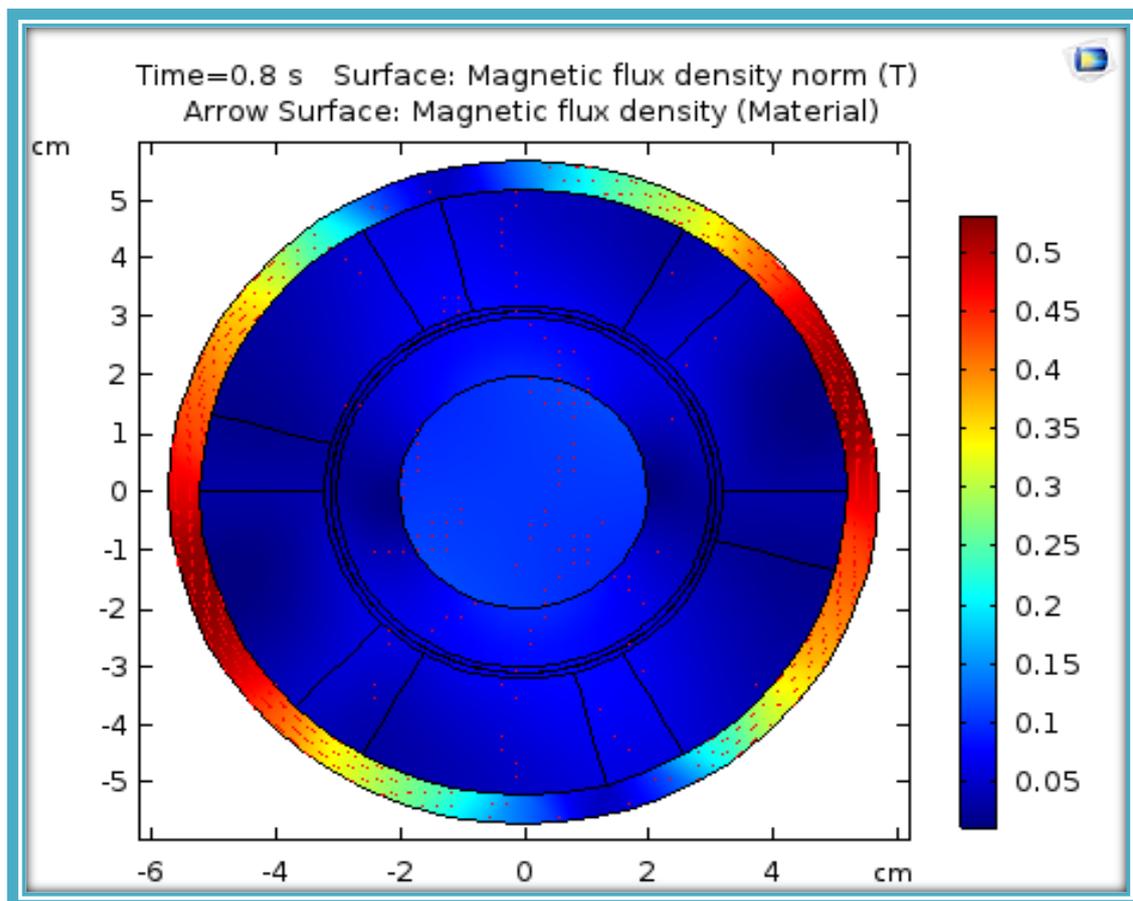
### IV. 2. 2. 7 Résolution du problème

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est possible d'accéder à des menus pour modifier la résolution. De même, lors de la résolution d'un problème multi- physique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables.

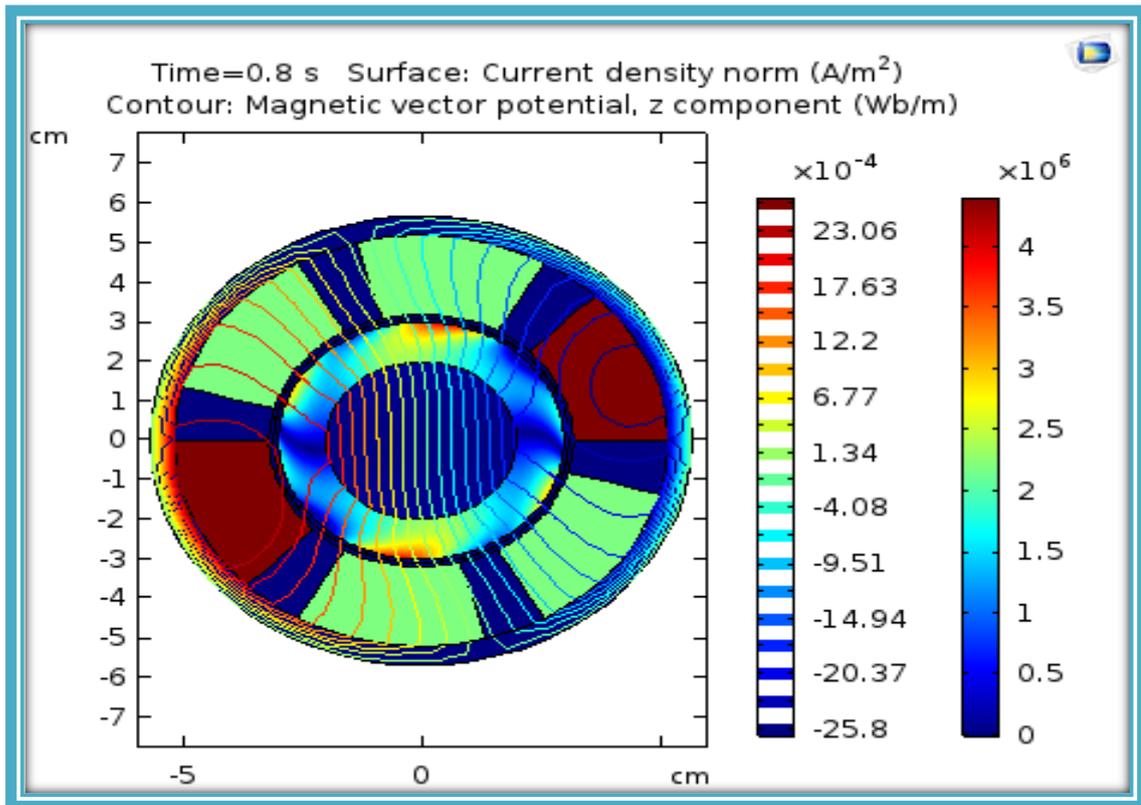
### IV. 2. 2. 8 Analyse des résultats

Lorsque le programme converge vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de post traitement, qui permet d'analyser et de visualiser les différents résultats à caractère électrique, magnétique, et mécanique.

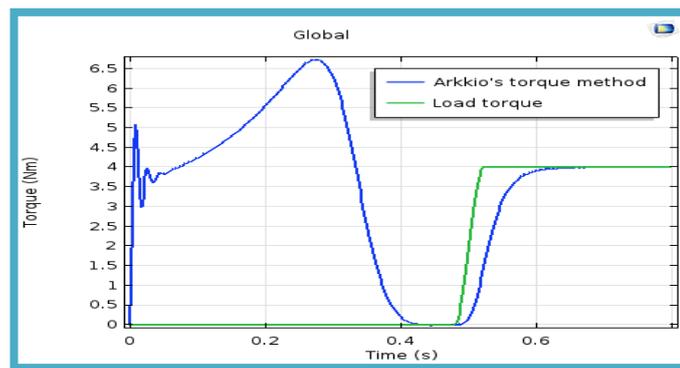
Les figures IV. 10, IV. 11, IV. 12 et IV. 13 représentent respectivement les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ , la densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ , la variation instantané du couple utile et la variation instantané de la vitesse du moteur.



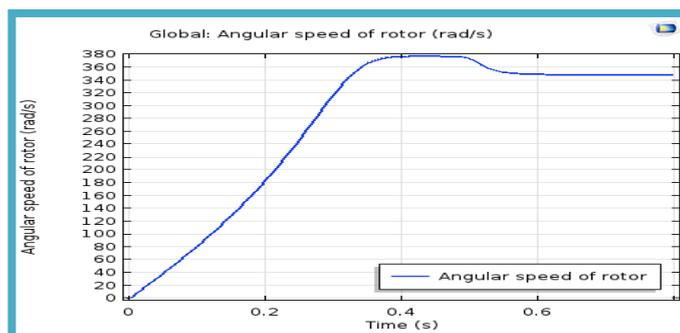
**Figure IV. 10.** Les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ .



**Figure IV. 11.** La densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ .



**Figure IV. 12.** La variation instantané du couple utile.



**Figure IV. 13.** La variation instantanée de la vitesse du moteur.

### IV.2.3 Interprétation

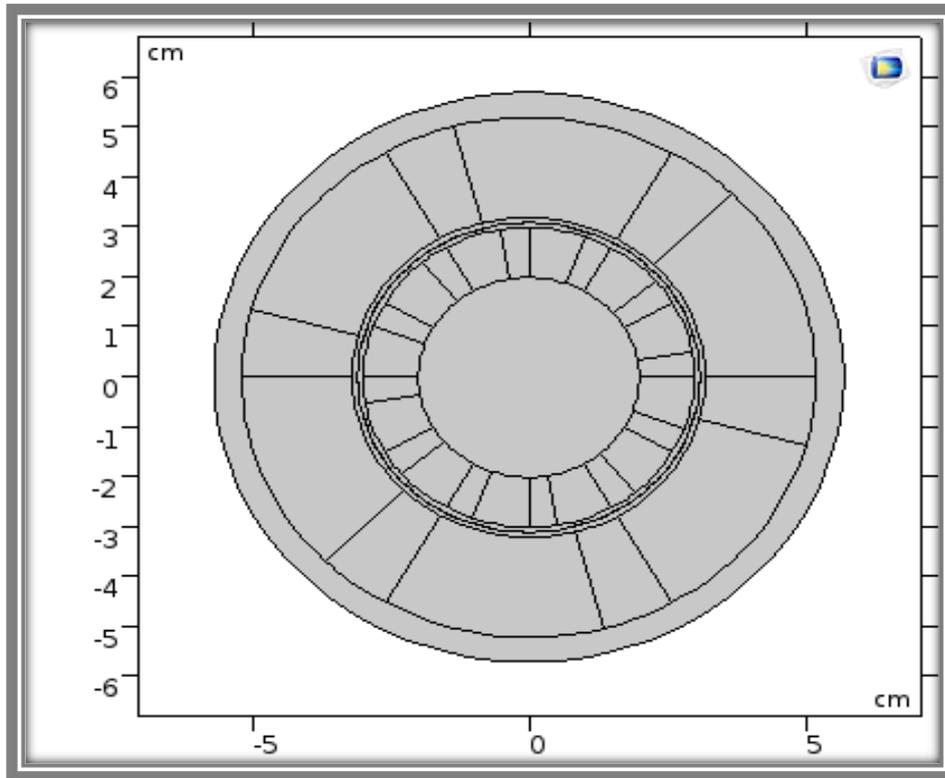
D'après ces résultats, nous remarquons que la distribution de potentiel vecteur magnétique est intense au voisinage des bobines du stator, il atteint des valeurs maximales à cause de la présence du courant dans ces bobines. Par contre la distribution de potentiel vecteur magnétique dans l'air est faible. Les sens de rotation de champ de vecteur magnétique  $A$  et le vecteur de densité du courant sont les mêmes. On voit bien que les vecteurs de l'induction magnétique sont canalisés dans le circuit magnétique du stator à cause de la perméabilité magnétique importante du matériau. Nous remarquons aussi d'après la figure IV.12 et IV. 13 que le couple utile prend une valeur élevée durant un régime transitoire de 0.3s, il atteint une valeur de 6.5 N.m. Après cette valeur, le couple utile diminue et il s'annule à l'instant  $t = 0.4s$ . A l'instant  $t = 0.5s$ , on impose une valeur du couple résistant égal à 4 N.m, le couple utile commence à augmenter pour atteindre cette valeur à l'instant  $t = 0.6s$  et il se stabilise durant un régime permanent à cette valeur. L'allure du couple utile agit sur l'évolution instantanée de la vitesse qui passe par un régime transitoire durant la même période, c'est-à-dire elle prend une valeur élevée. Entre la période  $t=0.4$  et  $0.5s$ , la vitesse prend une valeur constante par ce que le couple égale à 0, et à l'instant on impose un couple résistant c'est-à-dire moteur en charge, la vitesse diminue et prend une valeur constante égale à 350 rd/s durant un régime permanent. Les résultats de simulation obtenus sont identiques avec ceux obtenus dans le travail de K. Davey [17]

## IV. 3 Application N° 2 : Machine asynchrone du problème Workshop 30 avec une modification de la géométrie (modification du rotor).

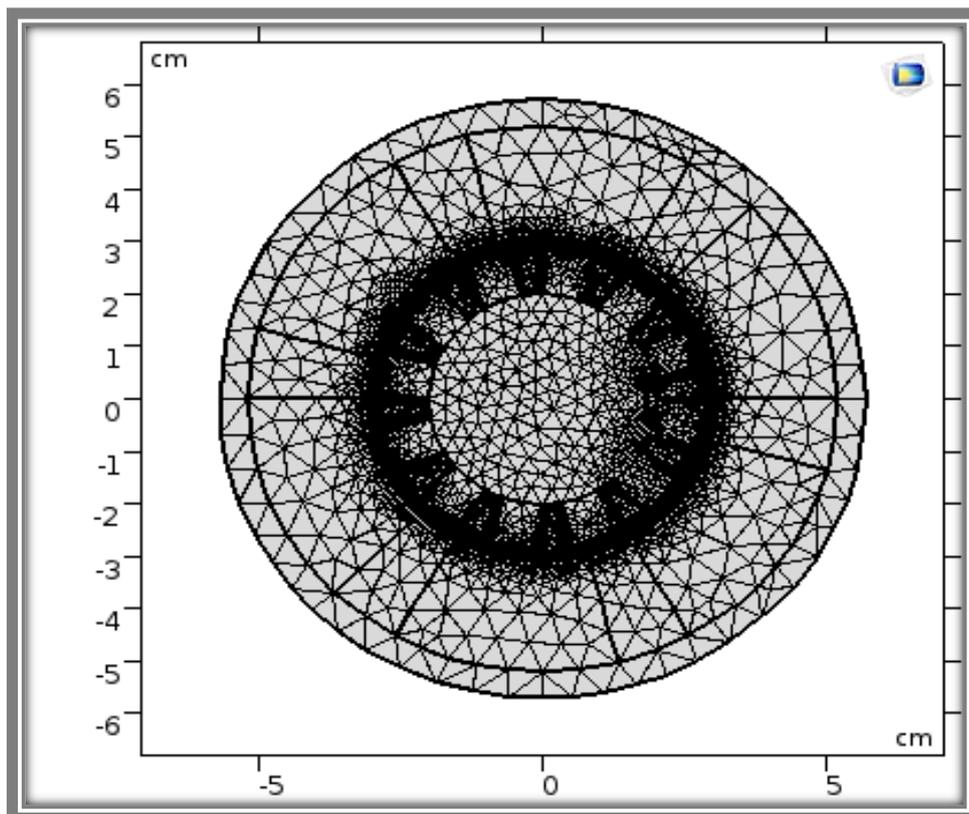
### IV.3.1 Influence des barres d'aluminium au rotor

Dans cette partie nous avons modifié la géométrie du rotor dans la machine ayant les mêmes propriétés physiques et géométriques présentées précédemment. Dans notre étude la machine est parcourue par trois courants sinusoïdaux décalés dans le temps.

Les figures IV. 14 et IV. 15 représentent respectivement la géométrie de la machine étudiée et le maillage du domaine d'étude.



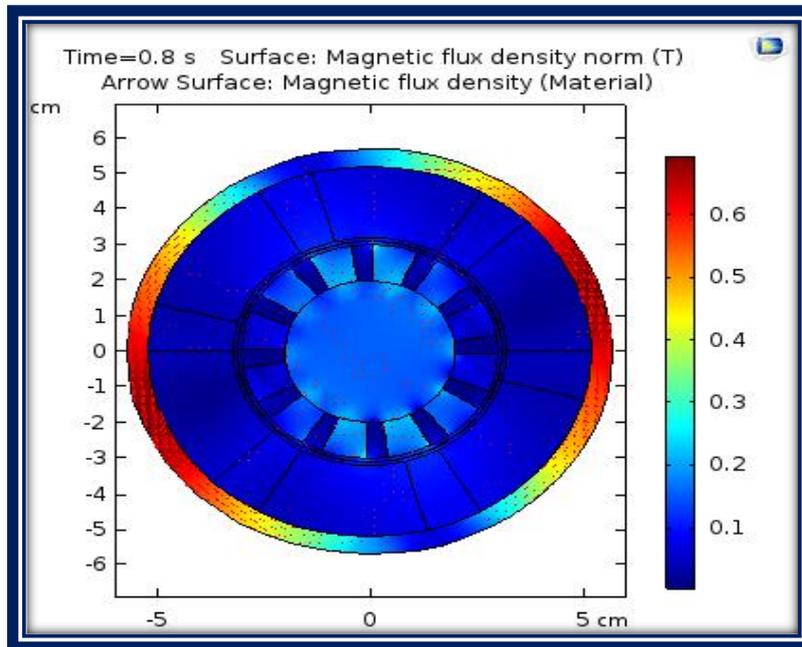
**Figures IV. 14.** La géométrie de la machine étudiée



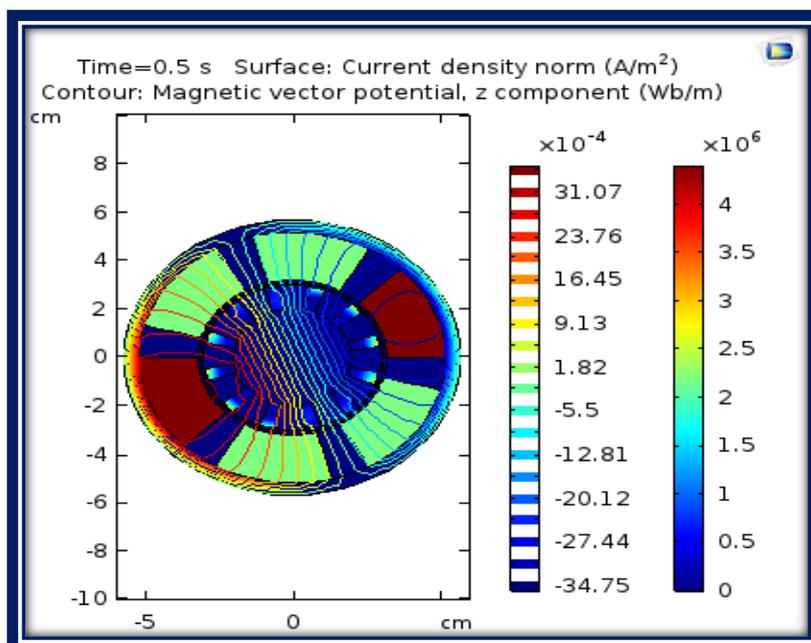
**Figure IV. 15.** Le maillage du domaine d'étude.

### IV.3.2 Résultats de simulation

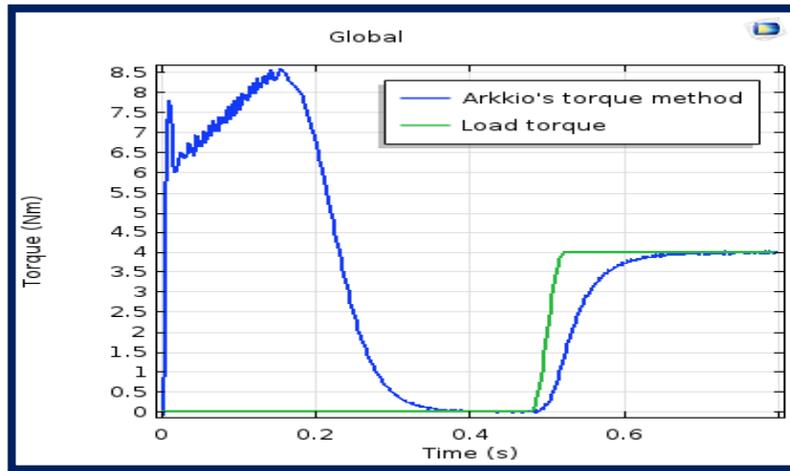
Le post processeur du logiciel COMSOL-Multiphysics permet de visualiser en 1D et 2D les diverses grandeurs magnétiques et mécaniques. Les figures IV. 16, IV. 17, IV. 18 et IV. 19 représentent respectivement les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ , la densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ , la variation instantané du couple utile et la variation instantané de la vitesse du moteur.



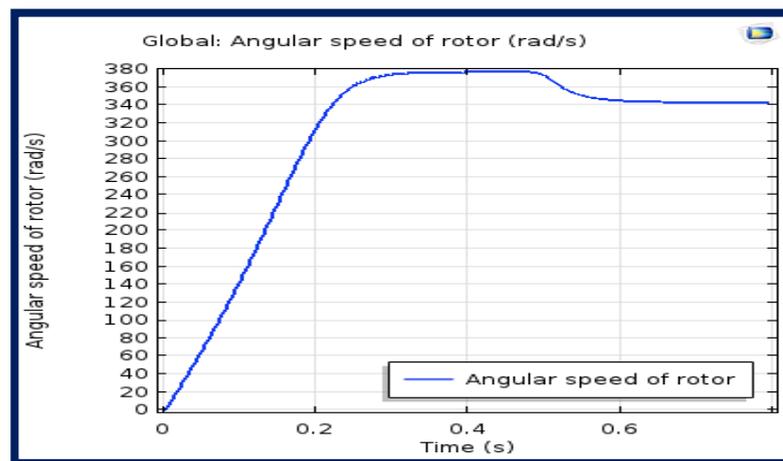
**Figure IV. 16.** Les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ .



**Figure IV. 17.** La densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 0.8s$



**Figure IV. 18.** La variation instantané du couple utile



**Figure IV. 19.** La variation instantanée de la vitesse du moteur.

### IV.3.3 Interprétation

D'après ces résultats, on constate que la distribution de potentiel vecteur magnétique est intense au voisinage des bobines du stator, il atteint des valeurs maximales à cause de la présence du courant dans ces bobines. Par contre la distribution de potentiel vecteur magnétique dans l'air est faible. Nous remarquons aussi que le potentiel vecteur magnétique prend des valeurs supérieures à ceux obtenus précédemment. Nous remarquons aussi que les vecteurs de l'induction magnétique sont canalisés dans le circuit magnétique du stator à cause de la perméabilité magnétique importante du matériau. Pour le couple utile, nous remarquons que il prend la même allure du cas précédent mais avec une valeur supérieure. Durant le régime transitoire le couple utile atteint 8.5 N.m à cause de la valeur de l'induction magnétique (0.6T). A partir de cette phase, le couple utile se stabilise durant un régime permanent, il atteint la valeur de 4 N.m. L'évolution instantanée de la vitesse est influencée par la variation du couple c'est-à-dire elle passe par un régime transitoire durant la même

période c'est-à-dire elle prend une valeur élevée. Entre la période  $t=0.4$  et  $0.5s$ , la vitesse prend une valeur constante par ce que le couple égale à 0, et à l'instant on impose un couple résistant c'est-à-dire moteur en charge, la vitesse diminue et prend une valeur constante égale à 340 rd/s durant un régime permanent.

#### IV. 4 Application N° 3 : Machine asynchrone à deux pôles.

Maintenant, on va modéliser une troisième application constituée d'une machine asynchrone à deux pôles avec 36 encoches au stator et 28 barres d'aluminium pour deux fréquences d'alimentation  $f=60Hz$  et  $50Hz$ .

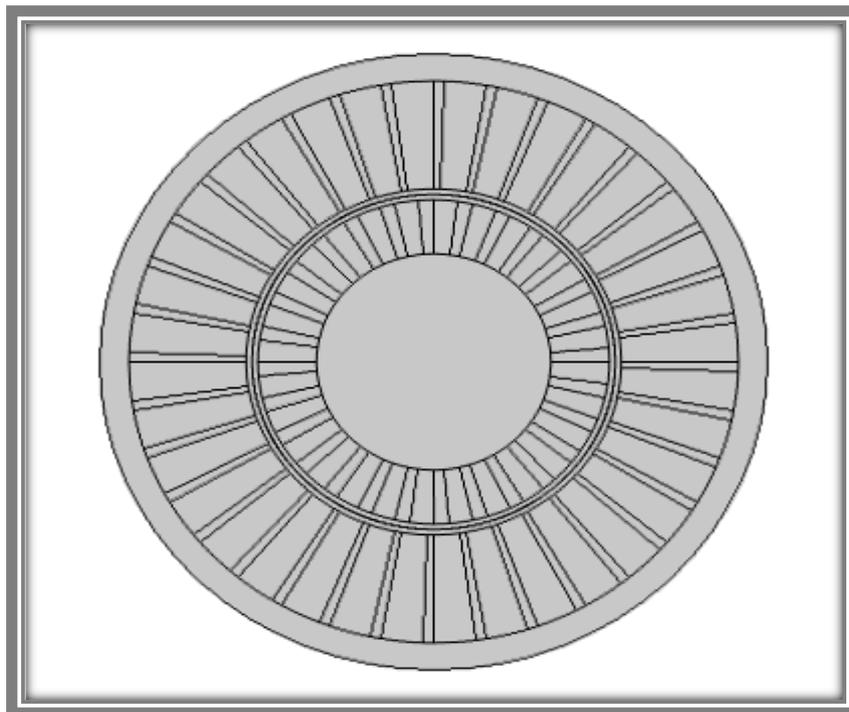
Les figures IV. 20 et IV. 21 représentent respectivement la géométrie de la machine étudiée et une coupe de cette machine.

La figure IV. 22 représente le maillage du domaine d'étude.

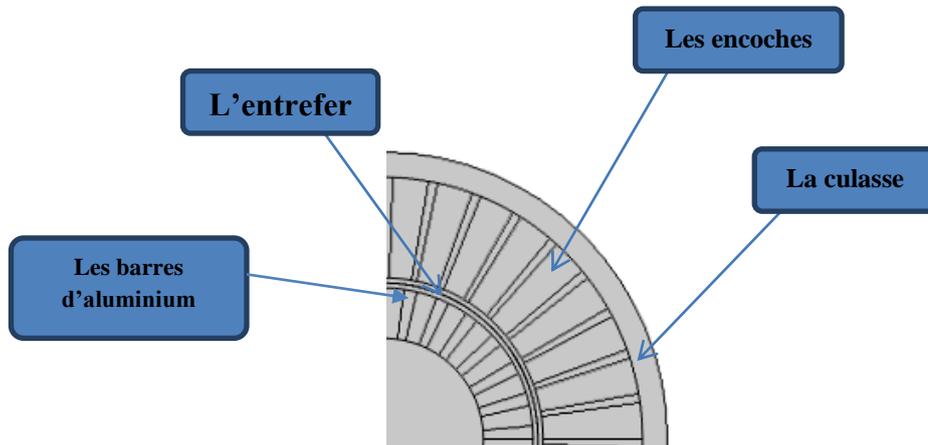
La figure IV.23 représente les courants d'alimentation  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$

$I_a$	$0.8[A]*\sqrt{2}*\cos(\omega_0*t)$	A	Current on phase A
$I_b$	$0.8[A]*\sqrt{2}*\cos(\omega_0*t+120[deg])$	A	Current on phase B
$I_c$	$0.8[A]*\sqrt{2}*\cos(\omega_0*t-120[deg])$	A	Current on phase C

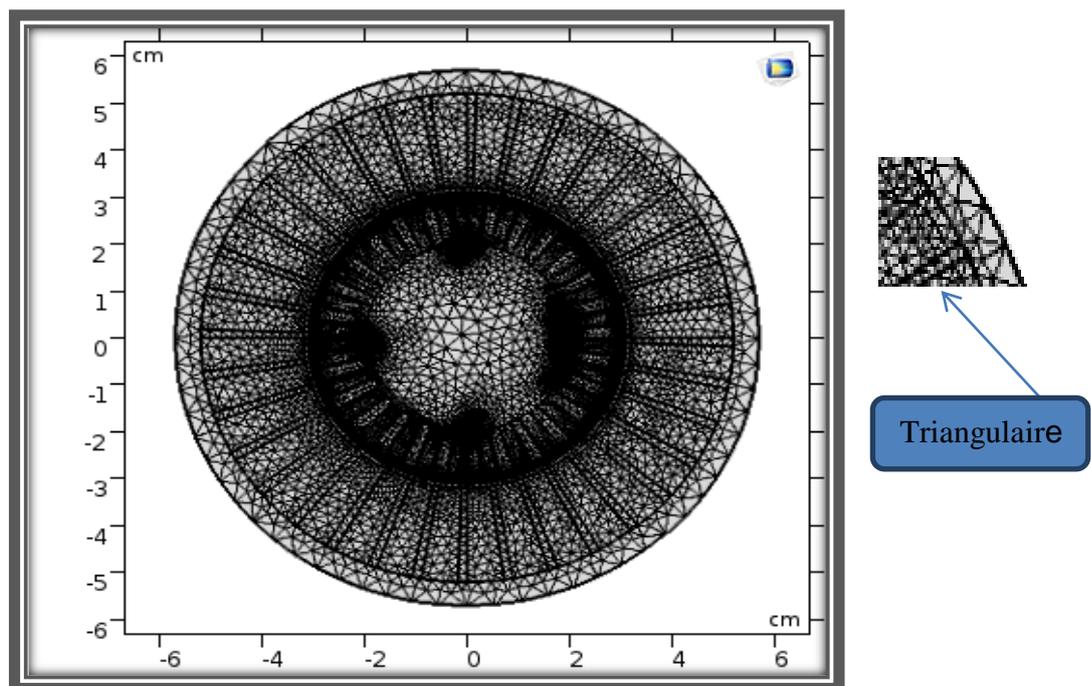
**Tableau IV. 2.** Les paramètres de simulation.



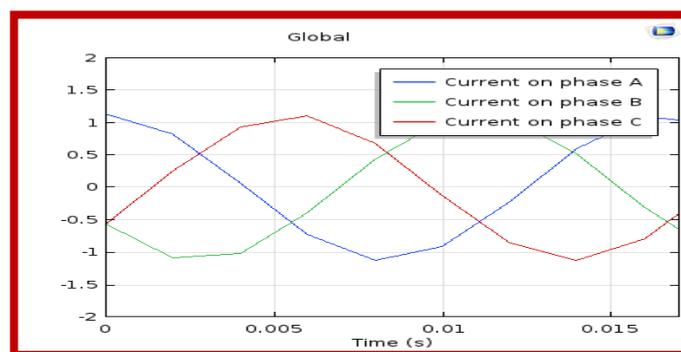
**Figure IV. 20.** La géométrie de la machine étudiée.



**Figure IV. 21.** Une coupe de cette machine.



**Figure IV. 22.** Le maillage du domaine d'étude..



**Figure IV. 23.** Les courants d'alimentations.

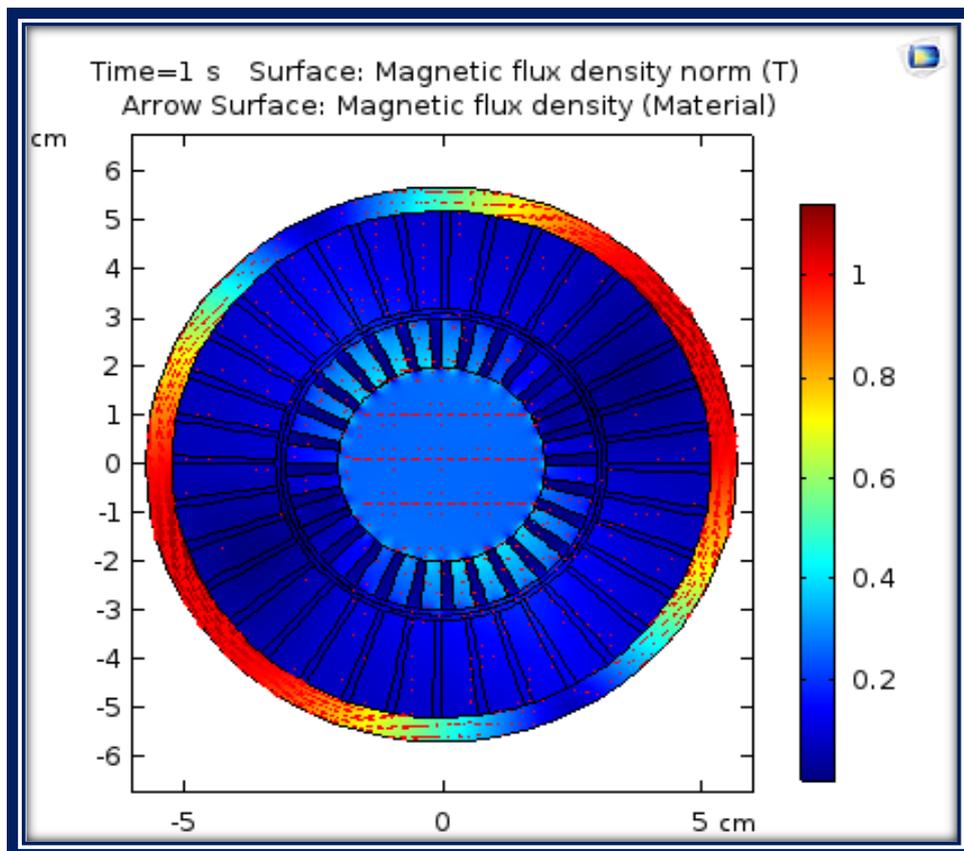
#### IV.4.1 Machine a deux pôles avec une fréquence $f= 60$ Hz

Dans cette partie nous avons étudié le couple et la vitesse de la machine asynchrone ayant les mêmes propriétés physiques et avec la variation de géométriques du stator et rotor 36 encoches sur le stator et 28 barres d'aluminiums au rotor et une fréquence d'alimentation égale à 60 Hz.

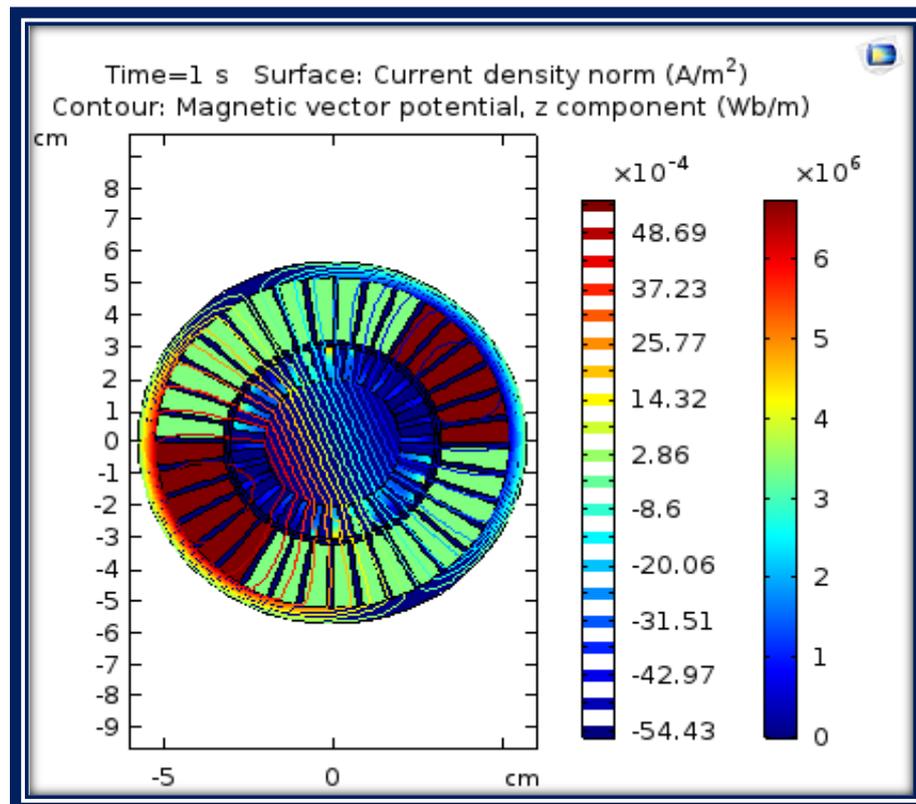
##### IV.4.1.1 Résultats de simulation

Le post processeur du logiciel COMSOL-Multiphysics permet de visualiser en 1D et 2D les diverses grandeurs magnétiques et mécaniques.

Les figures IV. 24 et IV. 25 représentent respectivement les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 0.8s$  et la densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ .



**Figure IV.24** les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 0.8s$



**Figure IV. 25.** La densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 0.8s$ .

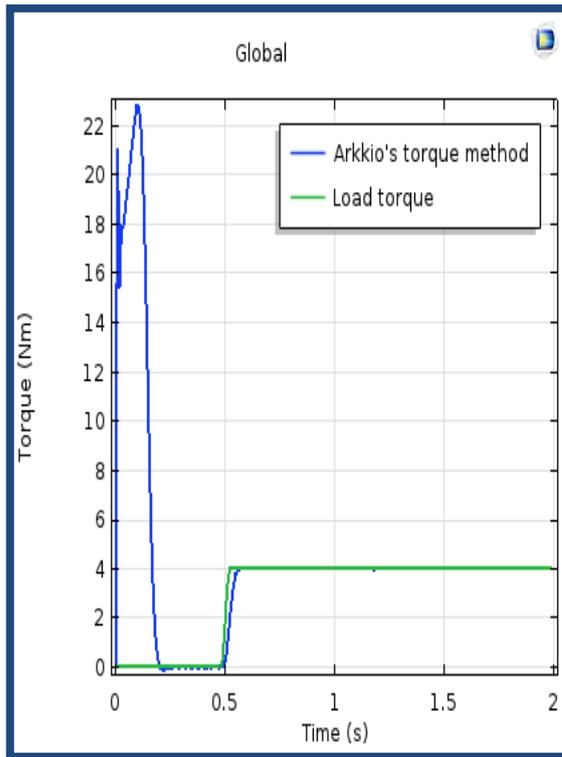
#### IV.4.1.2 Interprétation

D'après ces résultats, on constate que la distribution de potentiel vecteur magnétique est intense au voisinage des bobines du stator, il atteint des valeurs maximales et supérieures à ceux obtenus précédemment à cause de la valeur intense du courant dans les bobines. Cette augmentation provoque une augmentation de l'induction magnétique, il atteint la valeur de 1T.

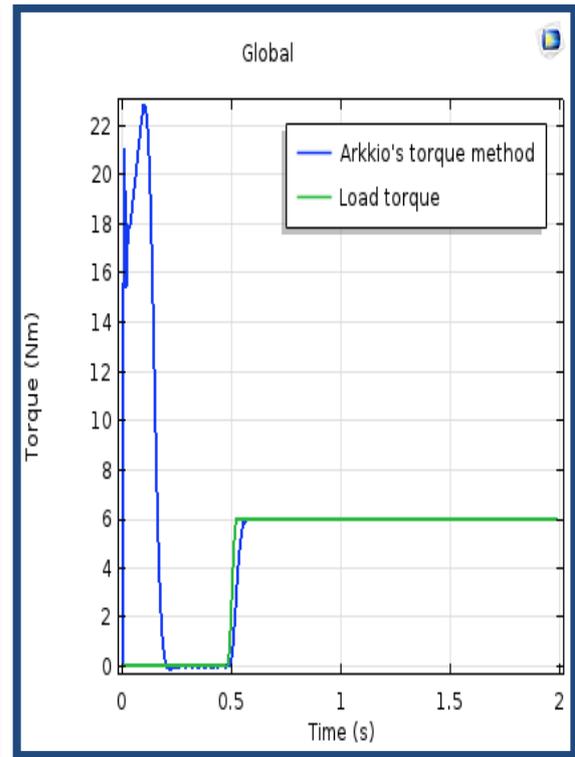
##### IV.4.1.1.1 Influence du couple résistant

La figure IV.26 (a-d) représente la variation instantanée du couple utile pour différents valeur du couple résistant respectivement  $C_r = 4, 6, 8$  et  $10$  N.m.

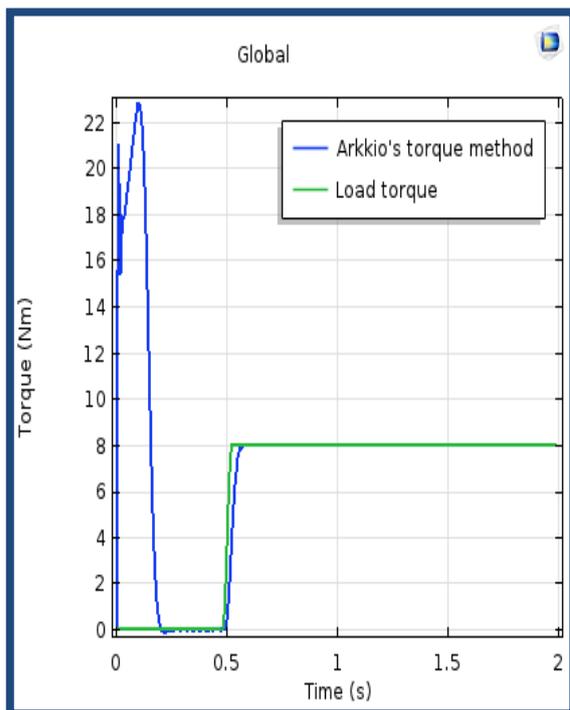
La figure IV .27 (a-d) représente la variation instantanée de la vitesse de rotation pour différents valeur du couple résistant respectivement  $C_r = 4, 6, 8$  et  $10$  N.m.



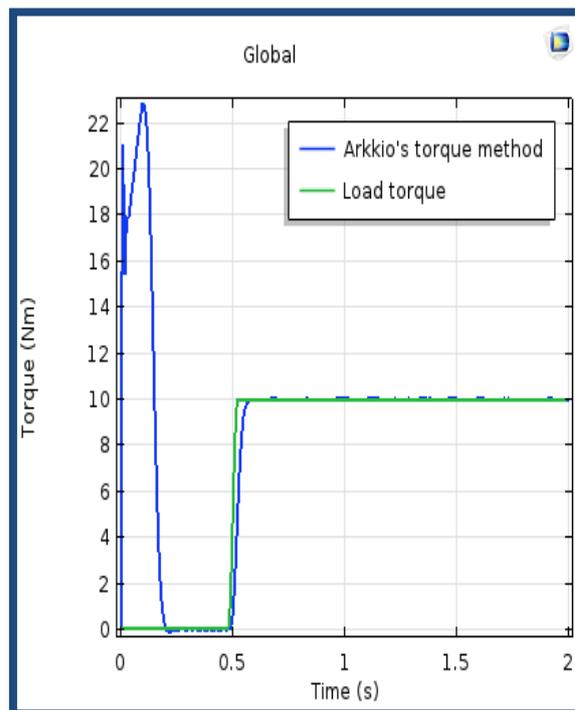
(a)



(b)

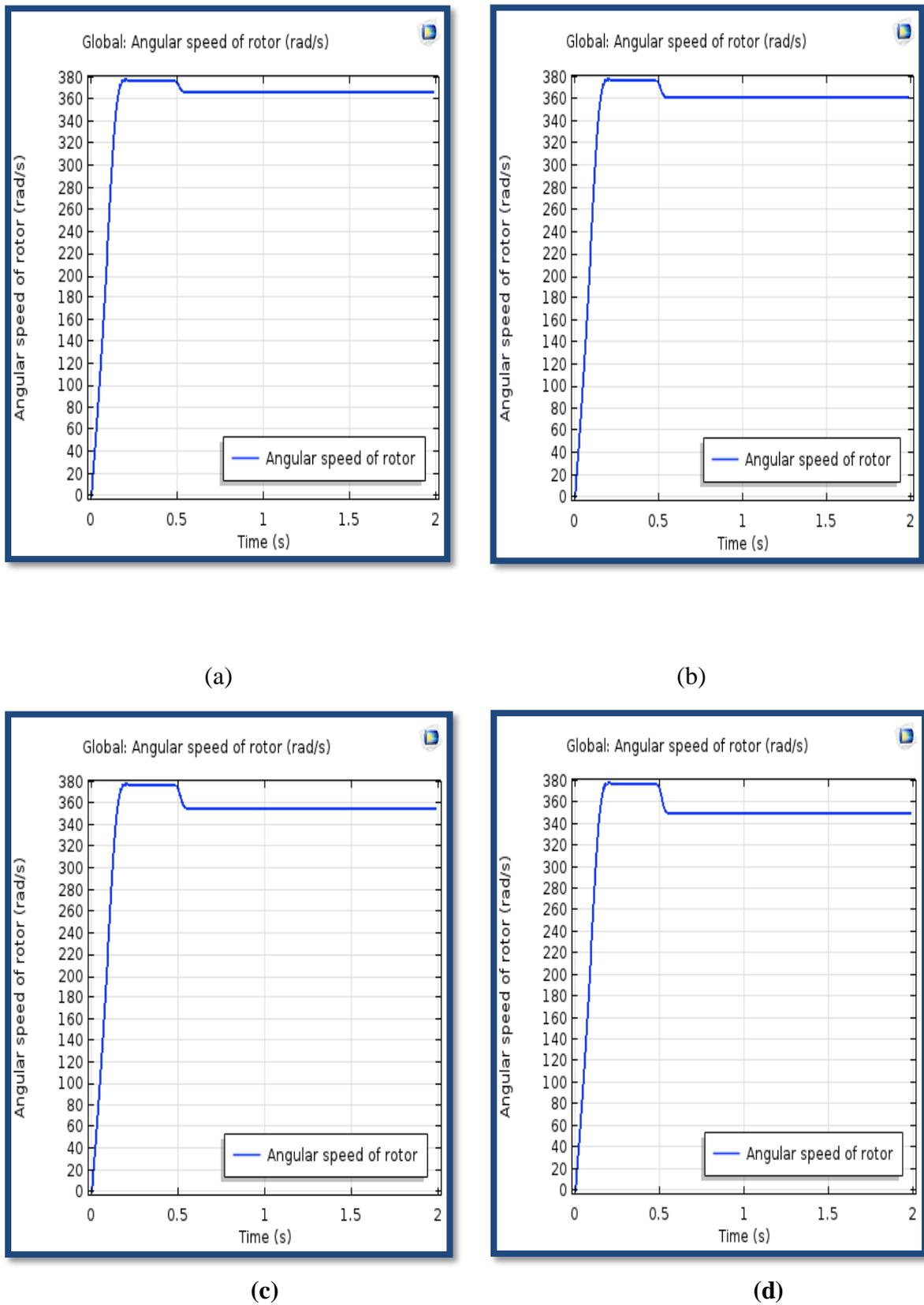


(c)



(d)

**Figure IV .26. (a-d)** La variation instantanée de la vitesse de rotation pour différents valeur du couple résistant respectivement  $C_r = 4, 6, 8$  et  $10$  N.m.



**Figure IV. 27. (a-d) :** La variation instantanée de la vitesse de rotation pour différents valeurs du couple résistant respectivement  $C_r = 4, 6, 8$  et  $10$  N.m.

#### IV.4.1.1.2 Interprétation

D'après ces résultats, nous remarquons que le couple utile prend la même allure de deux cas précédents mais avec une valeur supérieure. Durant le régime transitoire le couple utile atteint 22 N.m à cause de la valeur de l'induction magnétique (1T) pour les quatre cas. A partir de cette phase, le couple utile se stabilise durant un régime permanent, il atteint respectivement les valeurs imposés du couple résistant 4, 6, 8 et 10 N.m. L'évolution instantanée de la vitesse est influencée par la variation du couple c'est-à-dire elle passe par un régime transitoire durant la même période c'est-à-dire elle prend une valeur élevé. Lorsqu'on impose un couple résistant, la vitesse diminue avec l'augmentation du couple résistant. Elle atteint respectivement les valeurs 370, 360, 355 et 345 rd/s pour un couple résistant 4, 6, 8 et 10 N.m.

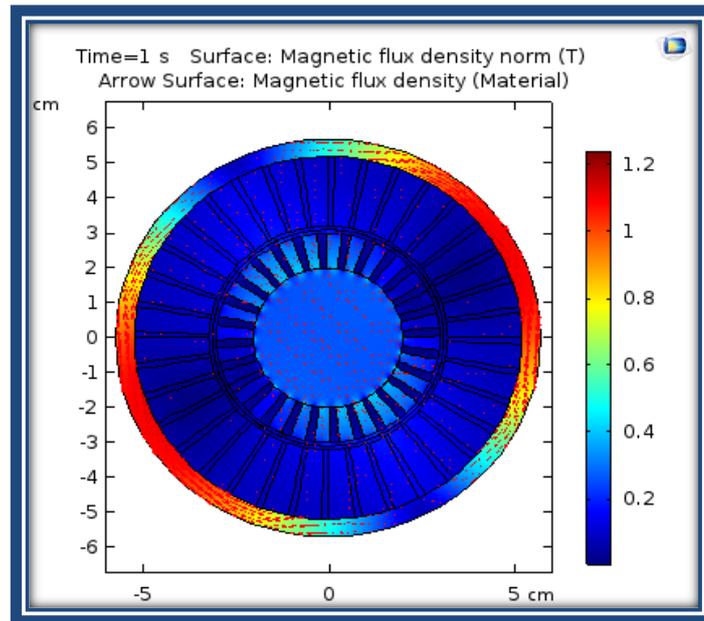
#### IV.4. 2 Machine a deux pôles avec une fréquence $f= 50$ Hz

Dans la deuxième partie nous avons étudié le couple et la vitesse de la machine asynchrone ayant les mêmes propriétés physiques et avec la variation de géométriques du stator et rotor 36 encoches sur le stator et 28 barres d'aluminiums au rotor et une fréquence d'alimentation égale à 50 Hz.

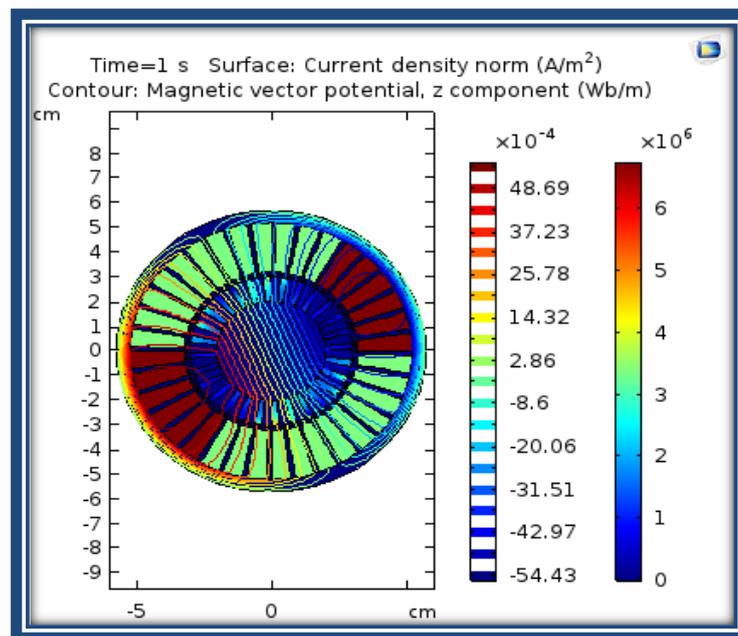
##### IV.4.2.1 Résultats de simulation

Le post processeur du logiciel COMSOL-Multiphysics permet de visualiser en 1D et 2D les diverses grandeurs magnétiques et mécaniques.

Les figures IV. 28 et IV. 29 représentent respectivement les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 1$ s et la densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 1$ s.



**Figure IV. 28.** Les vecteurs de l'induction magnétique à l'instant  $t = 1s$ .

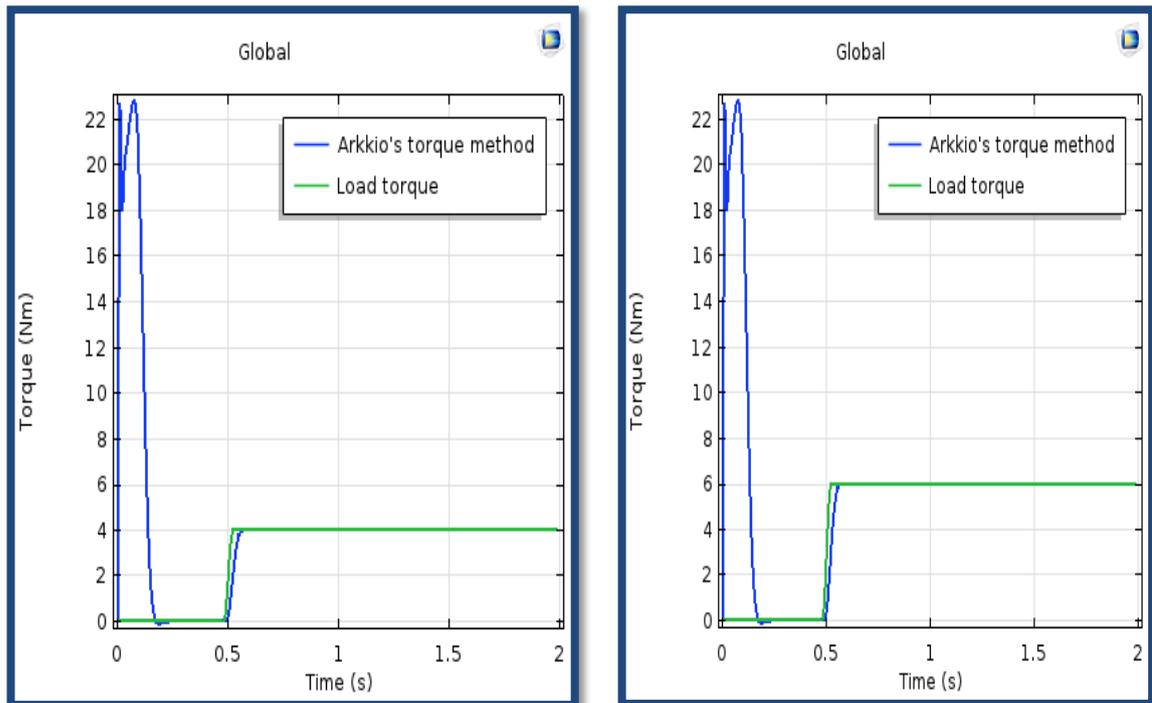


**Figure IV.29** La densité du courant avec les lignes du vecteur de potentiel magnétique à l'instant  $t = 1s$ .

#### IV.4.2.2 Interprétation

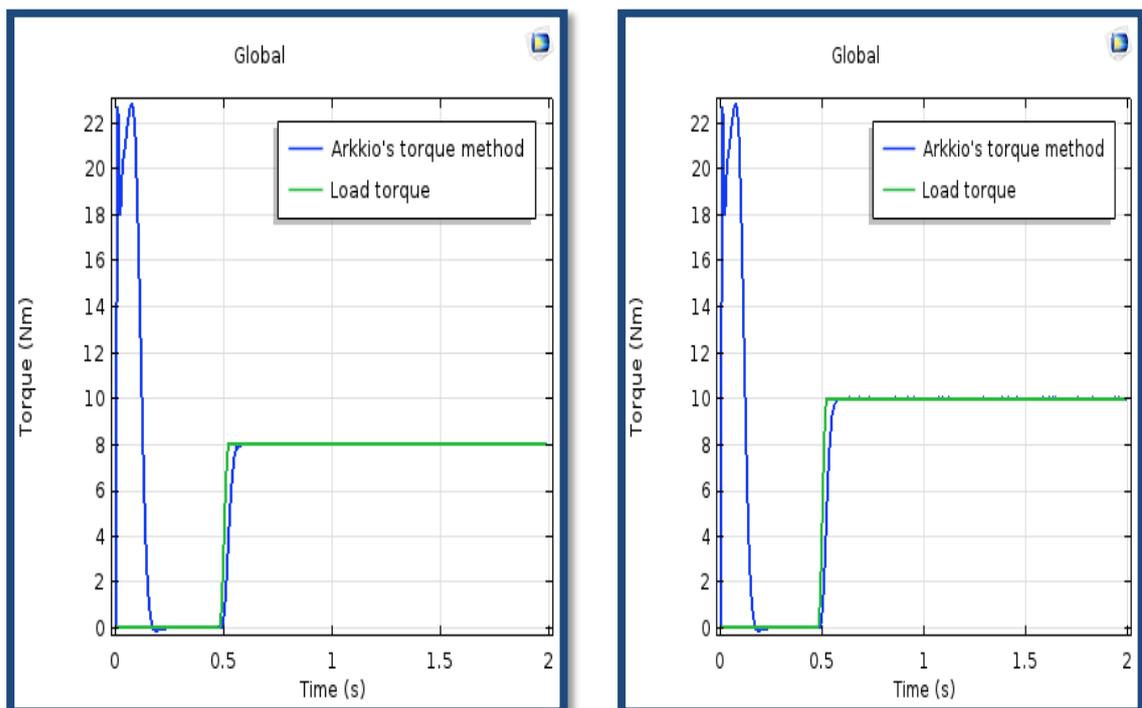
D'après ces résultats, on constate que la distribution de potentiel vecteur magnétique est intense au voisinage des bobines du stator, il atteint des valeurs maximales et supérieures à ceux obtenus précédemment à cause de la valeur intense du courant dans les bobines. Cette augmentation provoque une augmentation de l'induction magnétique, il atteint la valeur de 1.2T.

### IV. 4. 2. 1 Influence du couple résistant



(a)

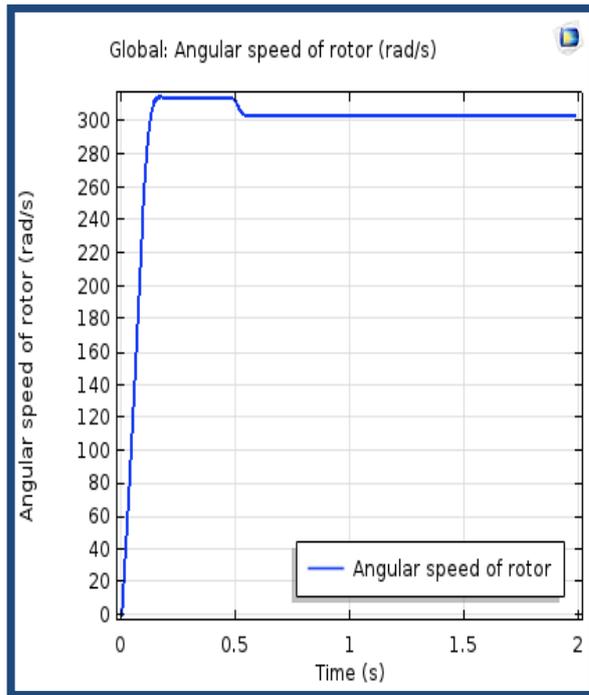
(b)



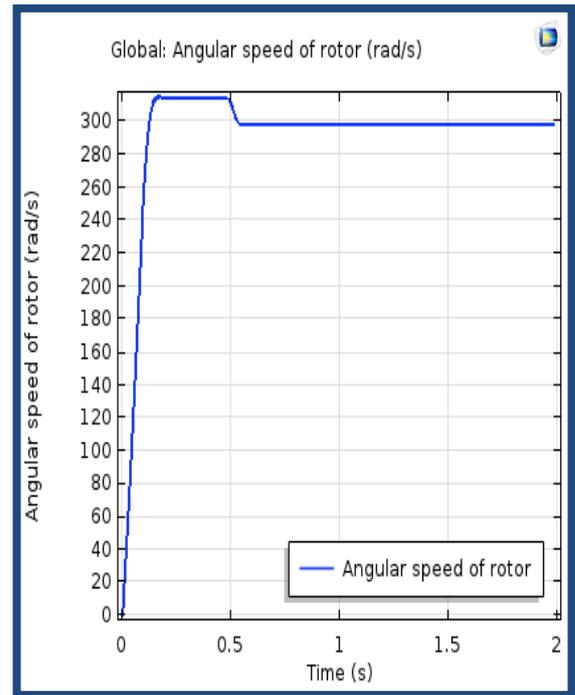
(c)

(d)

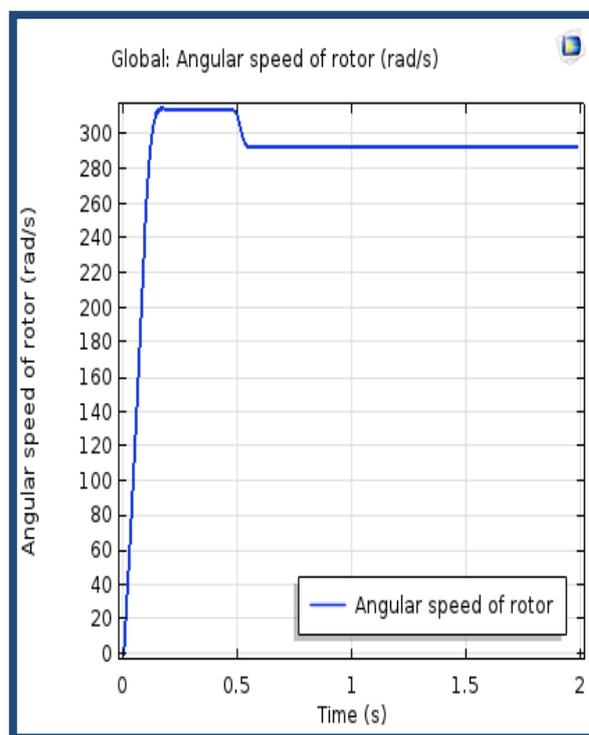
**Figure IV. 30. (a-d)** La variation instantanée du couple utile pour différents valeur du couple résistant respectivement  $C_r = 4, 6, 8$  et  $10$  N.m.



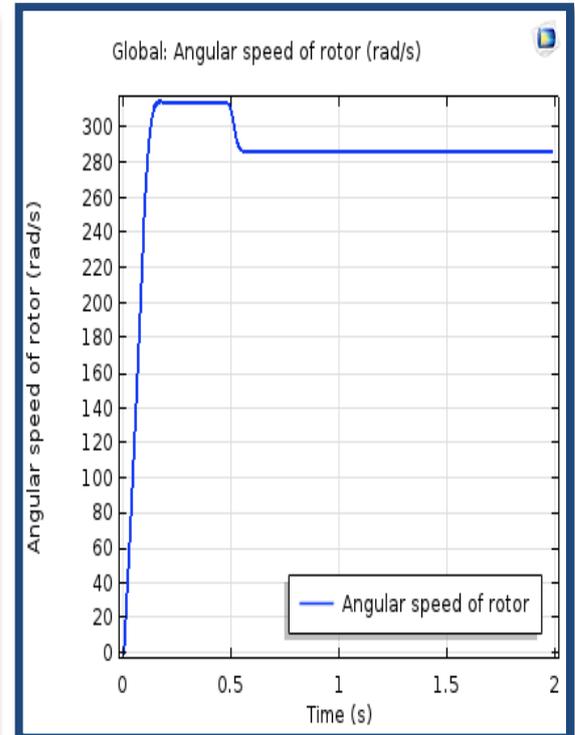
(a)



(b)



(c)



(d)

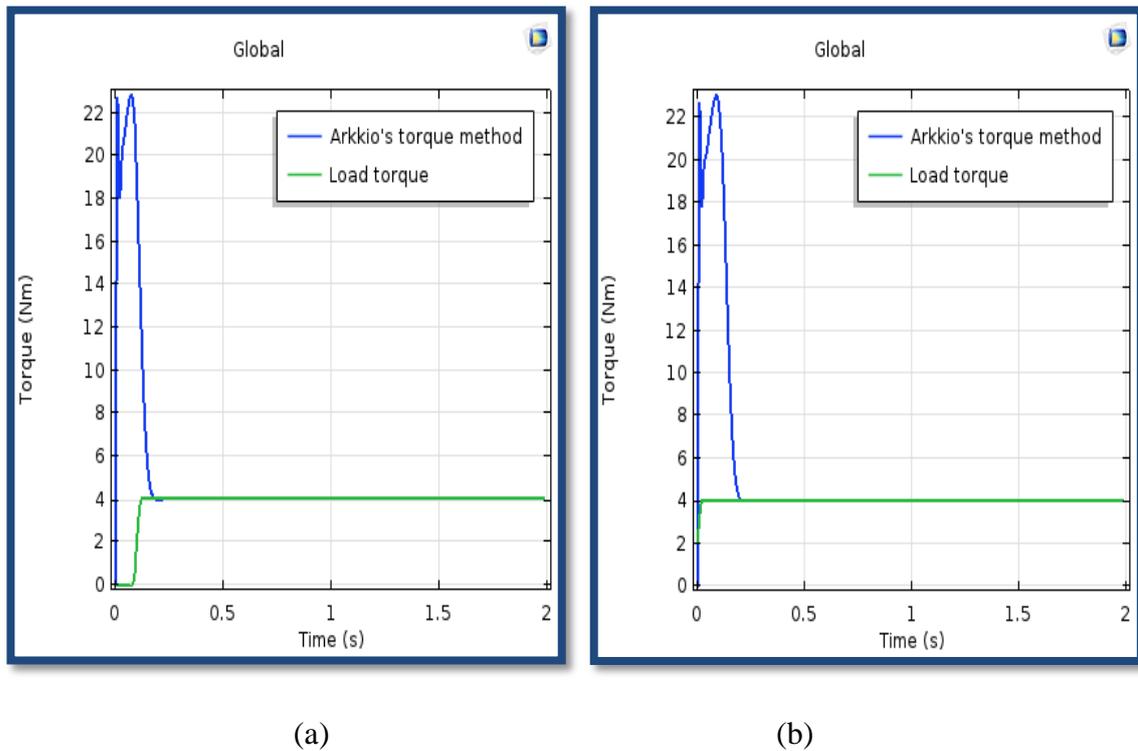
**Figure IV .31. (a-d)** La variation instantanée de la vitesse pour différents valeur du couple résistant respectivement  $C_r = 4, 6, 8$  et  $10$  N.m.

#### IV. 4. 2. 1. 2 Interprétation

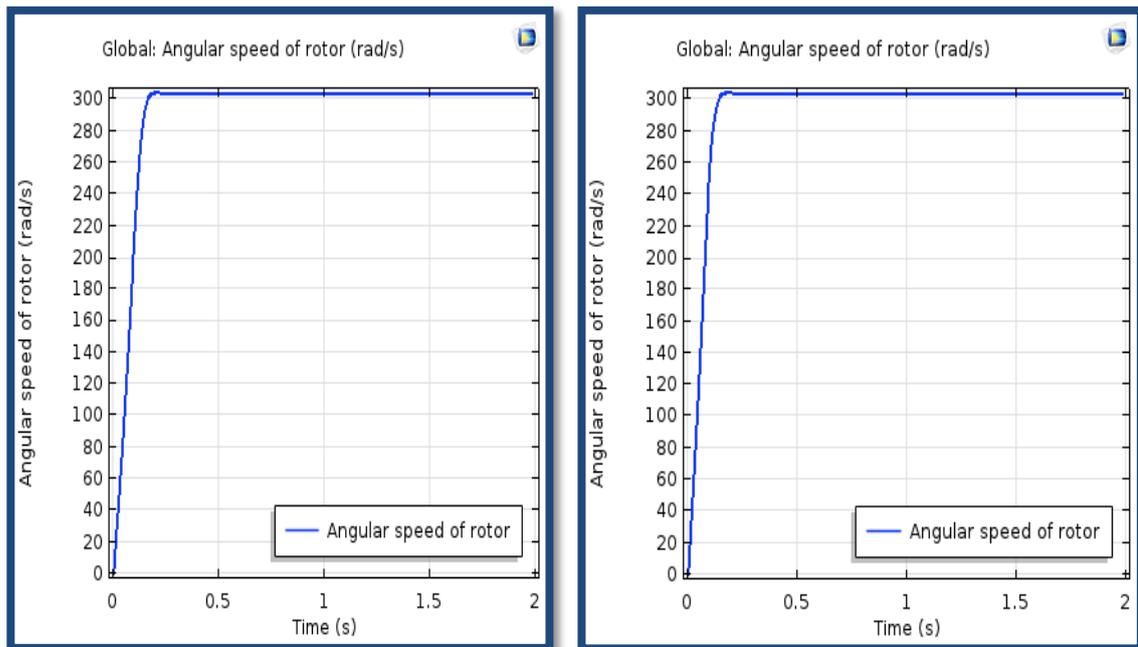
D'après ces résultats, nous remarquons que le couple utile prend la même allure que les cas précédents mais avec une valeur supérieure. Durant le régime transitoire le couple utile atteint 23N.m à cause de la valeur élevée de l'induction magnétique (1.2T) pour les quatre cas. A partir de cette phase, le couple utile se stabilise durant un régime permanent, il atteint respectivement les valeurs imposés du couple résistant 4, 6, 8 et 10 N.m. L'évolution instantanée de la vitesse est influencée par la variation du couple c'est-à-dire elle passe par un régime transitoire durant la même période c'est-à-dire elle prend une valeur élevée. Lorsqu'on impose un couple résistant, la vitesse diminue avec l'augmentation du couple résistant. Elle atteint respectivement les valeurs 300, 295, 290 et 285 rd/s pour un couple résistant 4, 6, 8 et 10 N.m.

#### IV. 4. 2. 1. 3 Influence de temps d'imposé un couple résistant

Les figures IV .32 (a-b) et IV. 33(a-b) représentent respectivement la variation instantanée du couple utile et la vitesse de rotation pour différents instant (0.1s , 0s) d'imposer une valeur de couple résistant égale 4Nm.



**Figures IV. 32. (a-b)** La variation instantanée du couple utile pour différents instant d'imposer une valeur de couple résistant.



**Figures IV. 33. (a-b)** La variation instantanée de la vitesse de rotation pour différents instant d'imposer une valeur de couple résistant.

#### IV. 4. 2. 1. 4 Interprétation

D'après ces résultats, nous remarquons que le couple utile est sensiblement influencé par le temps d'imposé une valeur du couple résistant même au démarrage c'est-à-dire le moteur peut démarrer en charge. De même pour la vitesse de rotation du moteur qui se stabilise rapidement et prend une valeur constante après le régime démarrage (transitoire).

#### IV. 5. Application N° 4 problème de cassure de barre

Dans cette partie de chapitre, nous modélisons une machine asynchrone avec un défaut de cassure de barres

##### IV. 5. 1 Deux barres cassées

##### IV. 5. 2 Résultats de simulation

Les figures IV.34 et IV. 35 représente respectivement le couple et la vitesse à l'état sein de la machine étudié..

La figure IV.36 (a-d) représente la variation instantanée de couple utile pour différents valeur de conductivité électrique  $\sigma = 1/4x$  , , et respectivement

La figure IV.37 (a-d) représente la variation instantanée de vitesse de rotation pour différents valeurs de conductivité électrique  $\sigma = 1/4x$ , , et respectivement.

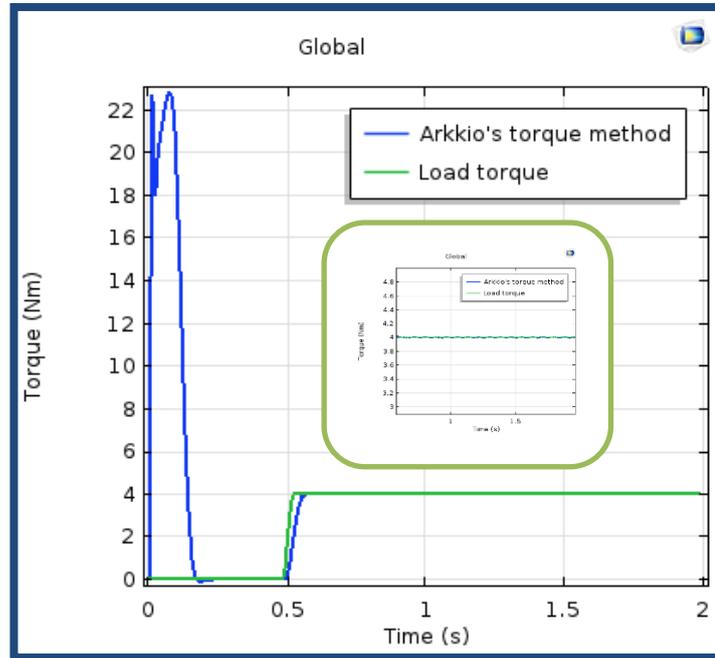


Figure IV. 34. Le couple à l'état sein de la machine étudié

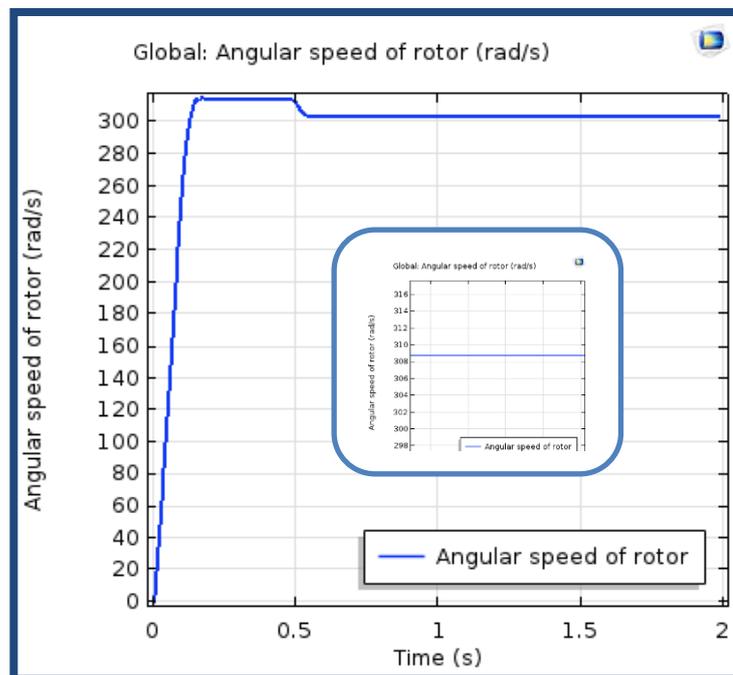
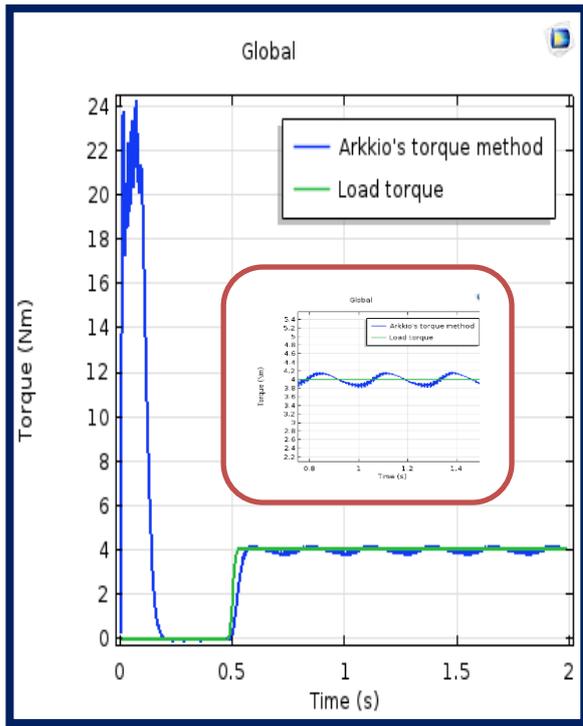
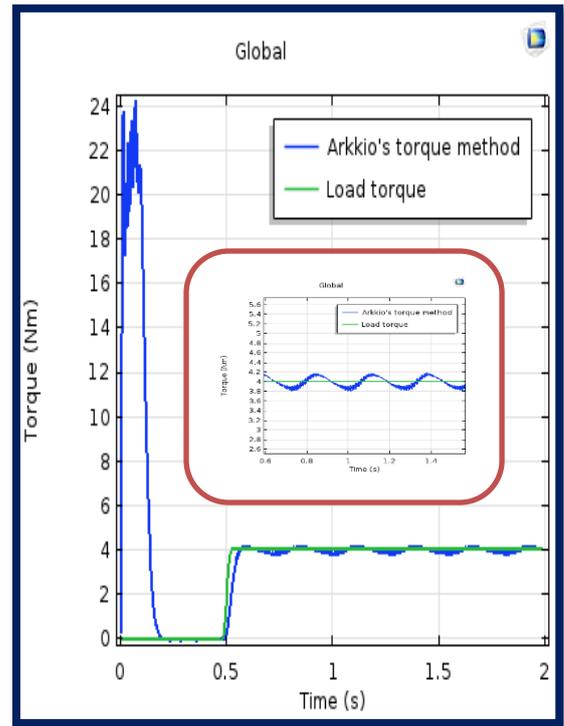


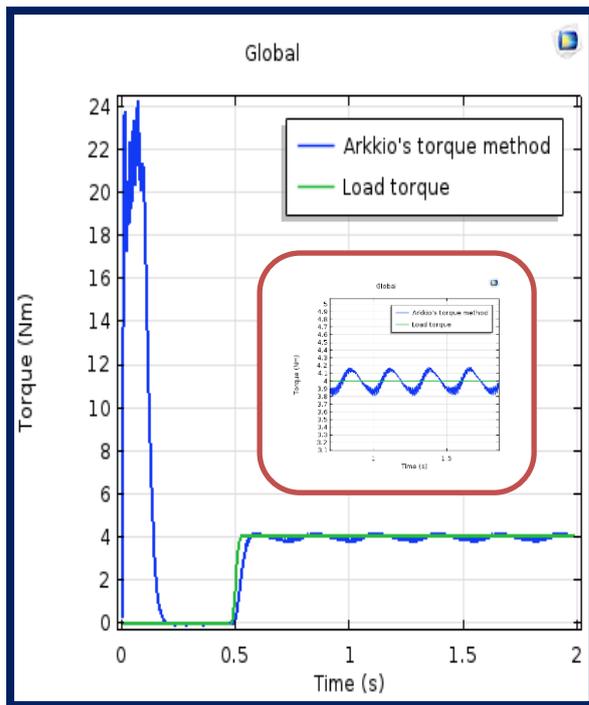
Figure IV. 35. La vitesse de rotation à l'état sein de la machine étudiée.



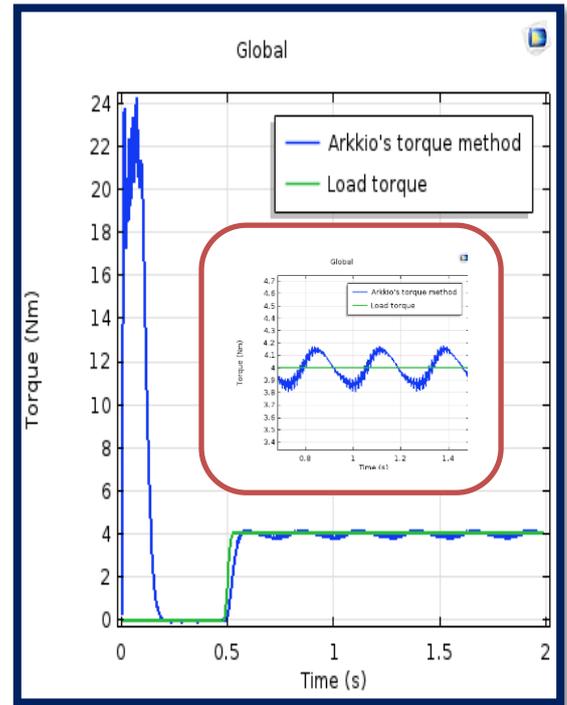
$$(a) \sigma = \frac{1}{2 * 3.72} 10^{-7}$$



$$(b) \sigma = \frac{1}{4 * 3.72} 10^{-7}$$

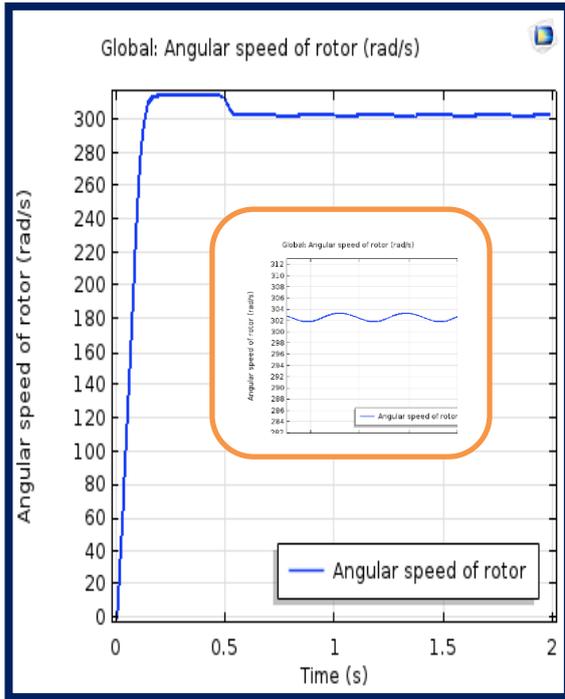


$$(c) \sigma = \frac{1}{6 * 3.72} 10^{-7}$$

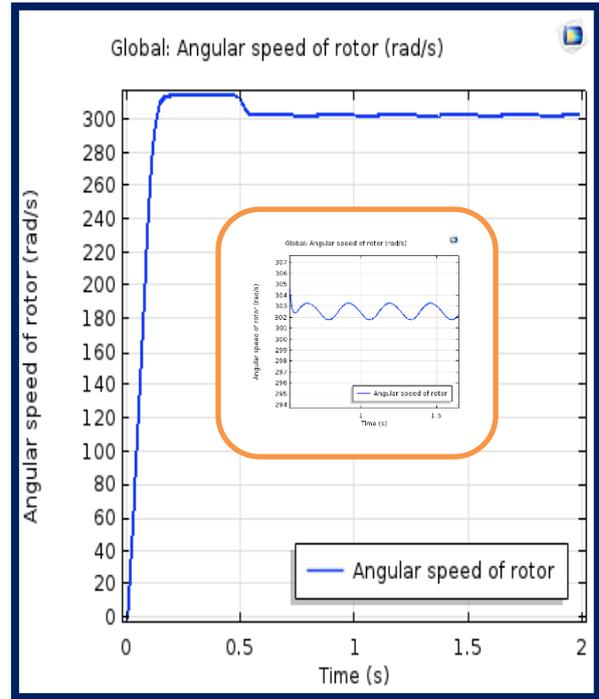


$$(d) \sigma = \frac{1}{8 * 3.72} 10^{-7}$$

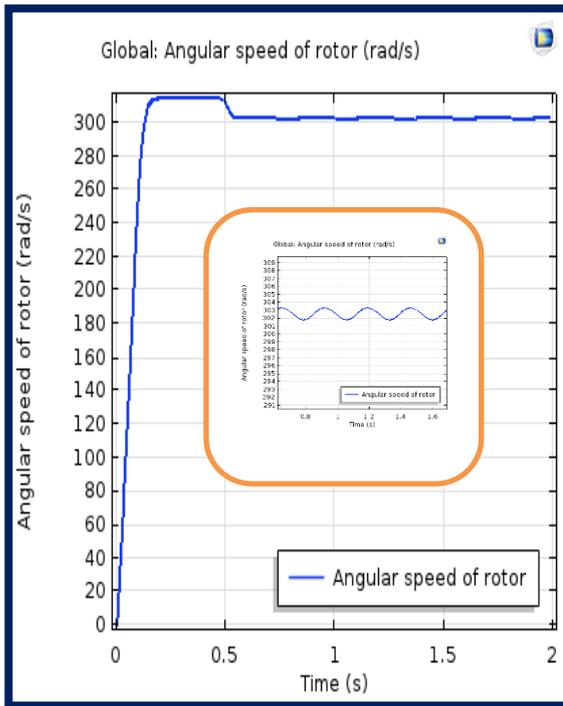
**Figure IV. 36. (a-d)** La variation instantanée du couple utile pour différents valeurs de sigma.



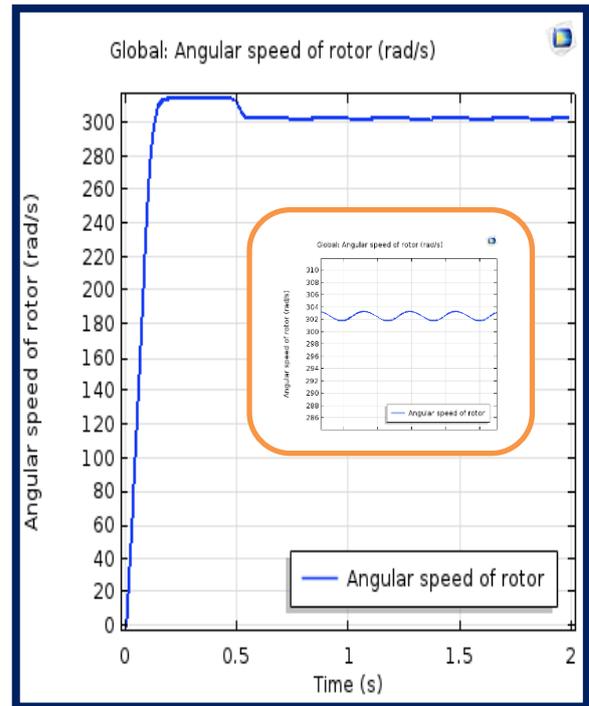
$$(a) \sigma = \frac{1}{2 * 3.72} 10^{-7}$$



$$(b) \sigma = \frac{1}{4 * 3.72} 10^{-7}$$



$$(c) \sigma = \frac{1}{6 * 3.72} 10^{-7}$$



$$(d) \sigma = \frac{1}{8 * 3.72} 10^{-7}$$

**Figure IV.37. (a-d)** La variation instantanée de la vitesse de rotation pour différents valeurs de sigma.

### **IV. 5. 3 Interprétation**

D'après les résultats obtenus nous remarquons qu'il y a une perturbation dans l'allure de couple en régime permanent. Cette perturbation devient importante, lorsque la résistance de la barre augmente 8 fois. Par contre, la vitesse de rotation est moins influencée par l'augmentation de la résistance, il y a une faible perturbation dans l'allure de vitesse.

### **VI. 6. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de la modélisation des phénomènes magnétodynamique dans une machine asynchrone. Ces résultats sont obtenus par le logiciel COMSOL Multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis. Notre résultat de simulation montre que il y a plusieurs paramètres influencés sur le couple et la vitesse de la machine.

*Conclusion  
générale*

## Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons présenté les résultats de la modélisation des phénomènes électromagnétiques et mécanique dans la machine asynchrone par le logiciel COMSOL-Multiphysics. Et dans notre étude, nous avons modélisé quatre types de machine, la première est mentionné comme un problème Workshope 30, la deuxième est un problème Workshope 30 mais avec une modification du rotor. La troisième est machine asynchrone à deux pôles avec 36 encoches au stator et 28 barres d'aluminium au rotor pour deux fréquences d'alimentation 50 et 60Hz. et dans la quatrième application nous étudions le problème de diagnostic de défauts. L'ensemble de notre rapport se situe dans :

- La modélisation des phénomènes magnétodynamique dans une machine asynchrone.
- Les différents résultats obtenus par le logiciel COMSOL-Multiphysics qui basé sur la méthode des éléments finis pour tous les types de la machine asynchrone étudié.
- La comparaison entre les résultats de simulation obtenus avec la considération de différents paramètres sur le fonctionnement de la machine.

Le couple et la vitesse de rotation dans tous les types de machine asynchrone étudiée sont sensibles à la valeur et au temps d'imposer le couple résistant. L'analyse des résultats montre que le bon choix des paramètres de la machine est d'une importance essentielle, si on veut assurer une meilleure concordance avec les résultats expérimentaux.

En perspective, et enfin d'obtenir une vision entière sur la modélisation des machines asynchrone, il serait intéressant de :

- Faire la modélisation d'une machine asynchrone à rotor bobiné en vue de leur commande,
- Faire le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone,

## Bibliographie

- [1] : **Mr. HAMADOU Adil et Mr. NESSISSEN Abdelkader** « Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil », Université Djilali BOUNAAMA , Khemis Miliana, juin 2015.
- [2] : **M. R et H. Z** "Contribution a l'étude des moteurs asynchrones à haut rendement ",Mémoire d'ingénieur,Université de M'sila 2005.
- [3] : **Zahir Ait ouali** « Application des FPGA à la commande d'un moteur asynchrone », mémoire pour l'obtention du diplôme de magister ,université mouloud mammeri de tizi-ouzou.
- [4] : **BERREHAIL Belkacem** « Identification des paramètres d'un moteur asynchrone a cage », mémoire de magistère, université de Batna.
- [5] : **SCHAEFFER.E,** « Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts ». Thèse de doctorat, Université De Nantes 1999.
- [6] : **MERABET SADDEK , HOUASSINE DJAAFAR** « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode de reconnaissance des formes » . Mémoire d'ingénieur Encadré par Pr. O.TOUHAMI Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Alger 2006/2007.
- [7] : **E. Scheffer,** «Diagnostic des machines asynchrones: modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts», Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 1999.
- [8] : **BOUMEGOURA Tarek** « Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic ». Thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Mars 2001.
- [9] : **M.BENBORDI Bachir** « DIAGNOSTIC DE DEFAUTS AU ROTOR PAR L'ANALYSE DE LA SIGNATURE DU COURANT MOTEUR » ,projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique , juin 2005.

- [10] : **BERREZZEK FARID** « Etude des Différentes Techniques de Commande des onduleurs à MLI Associés à une Machine A synchrone » mémoire de magister, Université Badji mokhtar annaba 2006.
- [11] : **Olivier ONDEL.** « Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur-machine asynchrone ». Thèse Doctorat. Ecole Centrale de Lyon, Octobre 2006.
- [12] : **Malika NEZAR.** « Diagnostic des associations convertisseurs statiques-machines asynchrone en utilisant les technique de l'intelligence artificielle ».thèse de doctorat. Université de Batna. Juin 2006.
- [13] : **BENDAOU. M. Abed Elhalim et HAFIANE. M. Tarek** « Modélisation des Phénomènes magnétothermique ans les dispositifs de limiteur de courant à base de supraconducteur à haute température critique»,Université kasdi merbah ouargla, juin 2015.
- [14] : **CHOUBAR Khoutir et HERREM Zin,** « Modélisation des phénomènes électromagnétiques par la méthodes des volumes finis dans un dispositif axisymétrique», Université mohamed boudiaf de M'sila, juin 2006.
- [15] : **Bahamma Hacene,** « Etude géométrique des inducteurs utilisés dans une cuisson par induction», Université Mohamed Khider Biskra, Juin 2014.
- [16] : **DEBOUB Ilyas** « Etude Et Dimensionnement D'une Machine Supraconductrice », Université Mohamed Khider Biskra, Juin 2017.
- [17] : **K. Davey,** "Induction Motor Analysis: International TEAM Workshop Problem 30,"
- [18] : **M. ADEL Kara ,** "Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué", Université de Setif 1, Décembre 2013.
- [19] : **F. AOUABED,** Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP, setif: universite ferhat abbas, 2011.
- [20] : **D. Euvrard,** troisième édition : Résolution numérique des équations aux dérivés partielles, 1994

- [21] : **Lotfi. Chouikhi** « palier à lévitation magnétique: modélisation et optimisation», mémoire de magistère, université de constantine 2002.
- [22] : **Ali.rezik** «étude comparative des différents modèles éléments finis pour le calcul des forces d'origine magnétique» mémoire de magistère 'université de Jijel ,2002.
- [23] : **HOCINI Farid** «Association de la commande pour l'étude par éléments finis des phénomènes magnéto-élastiques et vibratoires dans les systèmes électrotechniques.», Thèse de doctorat de l'université MOULOUD MAMMERI, Tizi-Ouzou 2013.